

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

JEAN RAPPENEAU

1^{re} THÈSE

RECHERCHES SUR LA COMBUSTION D'UN MÉLANGE D'HYDROCARBURES

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 25 mai 1954, devant la Commission d'Examen

Jury	{	MM. RIBAUD	{	Président.
		CABANNES		Examineurs.
		LAFFITTE		

[1954]



Digitized by the Internet Archive
in 2026

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

JEAN RAPPENEAU

1^{re} THÈSE

RECHERCHES SUR LA COMBUSTION D'UN MÉLANGE D'HYDROCARBURES

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 25 mai 1954, devant la Commission d'Examen

<i>Jury</i> }	MM. RIBAUD	<i>Président.</i>
	CABANNES	} <i>Examineurs.</i>
	LAFFITTE	

RECHERCHES SUR LA COMBUSTION D'UN MÉLANGE D'HYDROCARBURES

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen J. PÉRÈS

PROFESSEURS

G. JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	A. THOMAS	T	Biologie Cellulaire.
A. DENJOY	T	Théorie des fonctions.	ARNULF	T	Optique appliquée.
L. LUTAUD	T	Géologie physique et géologie dynamique.	Max MORAND . . .	T	Physique.
E. DARMOIS	T	Enseignement de Physique.	SOLEILLET	T	Physique.
Robert LÉVY	T	Physiologie comparée.	FORTIER	T	Mécanique expérimentale des fluides.
FOCH	T	Mécanique physique et expérimentale.	DANJON	T	Astronomie.
PAUTHENIER	T	Électrotechnique générale.	FROMAGEOT	T	Chimie biologique.
DE BROGLIE	T	Théories physiques.	LAPORTE	T	Physique générale et Radio-activité.
JOB	T	Chimie générale.	JANET	T	Mécanique analytique et mécanique céleste.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées.	PETIT	T	Biologie maritime.
GARNIER	T	Géométrie supérieure.	QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.
PÉRÈS	T	Mécanique des fluides et applications.	GALLIEN	T	Biologie animale (P.C.B.).
LAUGIER	T	Physiologie générale.	EICHHORN	T	Biologie végétale (P.C.B.).
M. CURIE	T	Physique (P.C.B.).	DE CUGNAC	T	Biologie végétale (P.C.B.).
G. RIBAUD	T	Hautes températures.	M ^{lle} CAUCHOIS . . .	T	Chimie-physique.
CROZE	T	Physique théorique et physique céleste.	THELLIER	T	Physique du globe.
DUPONT	T	Théories chimiques.	AUDUBERT	T	Électrochimie.
VALIRON	T	Calcul différentiel et calcul intégral.	L'HÉRITIER	T	Génétique.
BARRABÉ	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.	GRIVET	T	Radio-électricité.
G. DARMOIS	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	PONCIN	T	Mécanique des fluides.
Jacques BOURCART . .	T	Géographie physique et Géologie dynamique.	THIRY	T	Mécanique appliquée.
AUBEL	T	Chimie biologique.	DUBREIL	T	Arithmétique et théorie des nombres.
M ^{lle} JOLIOT-CURIE . . .	T	Physique générale et Radio-activité.	QUELET	T	Chimie (P.C.B.).
PLANTEFOL	T	Botanique.	CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
CABANNES	T	Recherches physiques.	CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.
GRASSÉ	T	Évolution des êtres organisés.	CUVILLIER	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.
PRÉVOST	T	Chimie organique.	JUNG	T	Pétrographie.
BOULIGAND	T	Application de l'analyse à la géométrie.	TRILLAT	T	Chimie-Physique.
CHAUDRON	T	Chimie appliquée.	WIEMANN	T	Chimie (M.P.C.).
WYART	T	Minéralogie.	JACQUINOT	T	Physique (P.C.B.).
TEISSIER	T	Zoologie.	VASSY		Physique de l'atmosphère.
MANGENOT	T	Biologie végétale.	DESTOUCHES . . .		Théories physiques.
P. AUGER	T	Physique quantique et relativité.	M. PRUVOST	T	Géologie.
MONNIER	T	Physiologie générale.	AMIEL	T	Chimie (P.C.B.).
PIVETEAU	T	Géologie.	HOCART	T	Minéralogie.
ROCARD	T	Physique.	J.-P. MATHIEU . . .	T	Physique (P.C.B.).
H. CARTAN	T	Mathématiques (E.N.S.).	COUTEAUX		Biologie animale (P.C.B.).
LAFFITTE	T	Chimie générale.	MAY		Biologie animale (P.C.B.).
FAVARD	T	Mécanique générale.	CHOQUET	T	Calcul différentiel et intégral.
COULOMB	T	Physique du globe.	FELDMANN		Biologie (P.C.B.).
M ^{lle} COUSIN	T	Biologie animale (P.C.B.).	GUINIER	T	Physique (P.C.B.).
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.	JOST	T	Biologie (P.C.B.).
P. DRACH	T	Zoologie.	FORTET		Calcul des probabilités.
KASTLER	T	Physique.	SCHWARTZ	T	Méthode math. de la Physique.
EPHRUSSI	T	Génétique.	CHOUARD	T	Physiologie Végétale.
WURMSER	T	Biologie physico-chimique.	MALAVARD	T	Aviation.
RIVIÈRE	T	Géologie (P.C.B.).	BRELOT	T	Calcul différentiel.
GAUTHERET	T	Biologie Végétale (P.C.B.).	NORMANT	T	Chimie (P.C.B.).
LUCAS	T	Physique.	BENARD		Chimie (P.C.B.).
			BUVAT		Botanique (E.N.S.).
			DUGUE		Statistique Mathématique.
			GELOSO		Chimie (S.P.C.N.).
			SOULAIRAC		Psychophysiologie.
			ULRICH		Physiologie végétale.
			MARÉCHAL		Optique théorique et appliquée

Secrétaire général Ch. MONIER

A mes parents,

A ma femme.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
INTRODUCTION	1
CHAPITRE PREMIER. — Données théoriques sur la combustion du kérosène dans l'air.	3
1,1	3
1,2 Combustion complète sans dissociations — Mélanges pauvres	4
1,3 Les dissociations possibles	6
1,4 Combustion en tenant compte des dissociations — Mélanges pauvres	8
1,5 Combustion en mélange riche	10
1,6 Résultats	11
1,7 Rendements de combustion	16
CHAPITRE II. — Les méthodes de mesure	20
2,1	20
2,2 Méthode d'analyse des gaz	21
2,3 Méthode de mesure des températures	26
CHAPITRE III. — Étude expérimentale de la combustion du kérosène dans une chambre de turboréacteur.	29
3,1 Installation de combustion	29
3,2 Mesure des températures et des concentrations en CO et CO ₂	32
3,3 Recherche des concentrations en oxyde nitrique présentes dans les gaz de combustion	51
3,4 Mesure des concentrations en oxygène	59
3,5 Processus de combustion du kérosène	61
CHAPITRE IV. — Étude de la flamme des mélanges Air-Kérosène.	63
4,1 Réalisation d'un brûleur Air-Kérosène	63
4,2 Propagation de la flamme dans des écoulements laminaires et turbulents	66
4,3 Etude de la vaporisation et des limites de stabilité des flammes	71
4,4 Observation des flammes laminaires et turbulentes	74
4,5 Mesure des vitesses de propagation des flammes laminaires et turbulentes	76
4,6 Mesure des températures de la flamme	80
Conclusion.	86
BIBLIOGRAPHIE	89

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

JEAN RAPPENEAU

1^{re} THÈSE

RECHERCHES SUR LA COMBUSTION D'UN MÉLANGE D'HYDROCARBURES

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 25 mai 1954, devant la Commission d'Examen

<i>Jury</i> }	MM. RIBAUD	<i>Président.</i>
	CABANNES	{ <i>Examineurs.</i>
	LAFFITTE	

RECHERCHES SUR LA COMBUSTION
D'UN MÉLANGE D'HYDROCARBURES

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen J. PÉRÈS

PROFESSEURS

G. JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	A. THOMAS	T	Biologie Cellulaire.
A. DENJOY	T	Théorie des fonctions.	ARNULF	T	Optique appliquée.
L. LUTAUD	T	Géologie physique et géologie dynamique.	Max MORAND	T	Physique.
E. DARMOIS	T	Enseignement de Physique.	SOLEILLET	T	Physique.
Robert LÉVY	T	Physiologie comparée.	FORTIER	T	Mécanique expérimentale des fluides.
FOCH	T	Mécanique physique et expérimentale.	DANJON	T	Astronomie.
PAUTHENIER	T	Électrotechnique générale.	FROMAGEOT	T	Chimie biologique.
DE BROGLIE	T	Théories physiques.	LAPORTE	T	Physique générale et Radio-activité.
JOB	T	Chimie générale.	JANET	T	Mécanique analytique et mécanique céleste.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées.	PETIT	T	Biologie maritime.
GARNIER	T	Géométrie supérieure.	QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.
PÉRÈS	T	Mécanique des fluides et applications.	GALLIEN	T	Biologie animale (P.C.B.).
LAUGIER	T	Physiologie générale.	EICHORN	T	Biologie végétale (P.C.B.).
M. CURIE	T	Physique (P.C.B.).	DE CUGNAC	T	Biologie végétale (P.C.B.).
G. RIBAUD	T	Hautes températures.	M ^{lle} CAUCHOIS	T	Chimie-physique.
CROZE	T	Physique théorique et physique céleste.	THELLIER	T	Physique du globe.
DUPONT	T	Théories chimiques.	AUDUBERT	T	Électrochimie.
VALIRON	T	Calcul différentiel et calcul intégral.	L'HÉRITIER	T	Génétique.
BARRABÉ	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.	GRIVET	T	Radio-électricité.
G. DARMOIS	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	PONCIN	T	Mécanique des fluides.
Jacques BOURCART	T	Géographie physique et Géologie dynamique.	THIRY	T	Mécanique appliquée.
AUBEL	T	Chimie biologique.	DUBREIL	T	Arithmétique et théorie des nombres.
M ^{me} JOLIOT-CURIE	T	Physique générale et Radio-activité.	QUELET	T	Chimie (P.C.B.).
PLANTEFOL	T	Botanique.	CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
CABANNES	T	Recherches physiques.	CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.
GRASSÉ	T	Évolution des êtres organisés.	CUVILLIER	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.
PRÉVOST	T	Chimie organique.	JUNG	T	Pétrographie.
BOULIGAND	T	Application de l'analyse à la géométrie.	TRILLAT	T	Chimie-Physique.
CHAUDRON	T	Chimie appliquée.	WIEMANN	T	Chimie (M.P.C.).
WYART	T	Minéralogie.	JACQUINOT	T	Physique (P.C.B.).
TEISSIER	T	Zoologie.	VASSY		Physique de l'atmosphère.
MANGENOT	T	Biologie végétale.	DESTOUCHES		Théories physiques.
P. AUGER	T	Physique quantique et relativité.	M. PRUVOST	T	Géologie.
MONNIER	T	Physiologie générale.	AMIEL	T	Chimie (P.C.B.).
PIVETEAU	T	Géologie.	HOCART	T	Minéralogie.
ROCARD	T	Physique.	J.-P. MATHIEU	T	Physique (P.C.B.).
H. CARTAN	T	Mathématiques (E.N.S.).	COUTEAUX		Biologie animale (P.C.B.).
LAFFITTE	T	Chimie générale.	MAY		Biologie animale (P.C.B.).
FAVARD	T	Mécanique générale.	CHOQUET	T	Calcul différentiel et intégral.
COULOMB	T	Physique du globe.	FELDMANN		Biologie (P.C.B.).
M ^{lle} COUSIN	T	Biologie animale (P.C.B.).	GUINIER	T	Physique (P.C.B.).
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.	JOST	T	Biologie (P.C.B.).
P. DRACH	T	Zoologie.	FORTET		Calcul des probabilités.
KASTLER	T	Physique.	SCHWARTZ	T	Méthode math. de la Physique.
EPHROSSI	T	Génétique.	CHOUARD	T	Physiologie Végétale.
WURMSER	T	Biologie physico-chimique.	MALAVARD	T	Aviation.
RIVIÈRE	T	Géologie (P.C.B.).	BRELOT	T	Calcul différentiel.
GAUTHERET	T	Biologie Végétale (P.C.B.).	NORMANT	T	Chimie (P.C.B.).
LUCAS	T	Physique.	BENARD		Chimie (P.C.B.).
			BUVAT		Botanique (E.N.S.).
			DUGUE		Statistique Mathématique.
			GELOSO		Chimie (S.P.C.N.).
			SOULAIRAC		Psychophysiologie.
			ULRICH		Physiologie végétale.
			MARÉCHAL		Optique théorique et appliquée

Secrétaire général Ch. MONIER

A mes parents,

A ma femme.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
INTRODUCTION	1
CHAPITRE PREMIER. — Données théoriques sur la combustion du kérosène dans l'air .	3
1,1	3
1,2 Combustion complète sans dissociations — Mélanges pauvres	4
1,3 Les dissociations possibles	6
1,4 Combustion en tenant compte des dissociations — Mélanges pauvres	8
1,5 Combustion en mélange riche	10
1,6 Résultats	11
1,7 Rendements de combustion	16
CHAPITRE II. — Les méthodes de mesure	20
2,1	20
2,2 Méthode d'analyse des gaz	21
2,3 Méthode de mesure des températures	26
CHAPITRE III. — Étude expérimentale de la combustion du kérosène dans une chambre de turboréacteur	29
3,1 Installation de combustion	29
3,2 Mesure des températures et des concentrations en CO et CO ₂	32
3,3 Recherche des concentrations en oxyde nitrique présentes dans les gaz de combustion	51
3,4 Mesure des concentrations en oxygène	59
3,5 Processus de combustion du kérosène	61
CHAPITRE IV. — Étude de la flamme des mélanges Air-Kérosène	63
4,1 Réalisation d'un brûleur Air-Kérosène	63
4,2 Propagation de la flamme dans des écoulements laminaires et turbulents	66
4,3 Etude de la vaporisation et des limites de stabilité des flammes	71
4,4 Observation des flammes laminaires et turbulentes	74
4,5 Mesure des vitesses de propagation des flammes laminaires et turbulentes . . .	76
4,6 Mesure des températures de la flamme	80
Conclusion	86
BIBLIOGRAPHIE	89

INTRODUCTION

L'étude des déflagrations et des détonations dans les mélanges gazeux a fait l'objet d'un nombre important de recherches théoriques et expérimentales. Les premiers travaux datent de 1870 et il serait vain d'entreprendre l'analyse des recherches effectuées jusqu'à maintenant. La plupart de ces recherches concernent les combustibles gazeux, tels que l'hydrogène, l'oxyde de carbone, les hydrocarbures, le gaz de ville, etc.; par contre, les combustibles liquides ont été comparativement très peu étudiés.

L'apparition d'engins propulsés par réaction, au cours de la dernière guerre, était liée à l'utilisation de différents combustibles liquides. La mise au point, hâtivement menée durant la guerre, des différents propulseurs à réaction fut, dans la majorité des cas, empirique. Depuis, on s'est préoccupé, tant en France qu'à l'étranger, de perfectionner le fonctionnement de ces engins et d'étudier la combustion de ces combustibles liquides. Parmi ceux-ci, le kérosène, mélange d'hydrocarbures provenant de la distillation du pétrole, occupe une place importante.

Dans le présent travail, nous nous proposons d'étudier la combustion du kérosène dans le foyer où ce carburant est normalement utilisé : une chambre de turboréacteur. Pour cela, il est essentiel d'analyser les gaz d'échappement provenant de la chambre, et de mesurer la température de ces gaz. Avant d'entreprendre ces mesures, nous avons déterminé, par des calculs théoriques, les températures et les concentrations des produits formés dans la combustion des mélanges Air-Kérosène. Puis, en considérant la conception du foyer utilisé, nous avons mis au point des méthodes de mesure appropriées.

Les mesures effectuées nous permettront de caractériser l'évolution des gaz, et d'établir le processus de combustion du kérosène dans la chambre de turboréacteur.

Mais, les résultats obtenus ne concernent que les gaz de combustion et ne donnent aucun renseignement sur la flamme. Celle-ci se propage, à l'intérieur de la chambre, dans des conditions mal définies; aussi, pour déterminer les caractéristiques de la flamme, nous réalisons un brûleur Air-Kérosène qui donne une flamme à cône bleu. Avec cet appareil, nous pourrions mesurer les vitesses de propagation des flammes laminaires et turbulentes ainsi que les températures de la flamme, et rechercher les conditions de vaporisation du kérosène.

En terminant cette introduction, je tiens à exprimer à M. le Professeur P. LAFITTE toute ma gratitude pour les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigués durant cette étude.

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Combustion de l'Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques. Je suis heureux d'exprimer à M. Maurice ROY, membre de l'Institut, Directeur Général de l'O. N. E. R. A., et à M. Jean SURUGUE, Directeur Scientifique à l'O. N. E. R. A., ma reconnaissance pour les moyens matériels qu'ils m'ont fournis.

Que M. Karl LUFT, Ingénieur à l'O. N. E. R. A., qui a bien voulu mettre à ma disposition ses analyseurs de gaz et me donner de précieux renseignements, trouve ici mes remerciements.

Je tiens également à remercier M. Jean WILHELM, M. Roger LOGEREAU et M. Olivier VIGUIÉ, techniciens à l'O. N. E. R. A., pour l'aide qu'ils m'ont apportée et les services qu'ils m'ont rendus dans l'exécution des calculs et des expériences.

CHAPITRE PREMIER

DONNÉES THÉORIQUES SUR LA COMBUSTION DU KÉROSÈNE DANS L'AIR

Le mélange d'hydrocarbures, appelé kérosène, que nous étudierons, est un pétrole distillant entre 166 et 251° C, de densité moyenne 0,78 à 15° C. L'analyse élémentaire d'un tel mélange donne, en poids, 85 % de carbone et 14 % d'hydrogène, ce qui correspond à la formule empirique moyenne C_n-H_m avec $n = 10,4$ et $m = 20,8$. Le kérosène est composé approximativement de 10 % de carbures aromatiques, 80 % de naphténiques et 10 % de paraffiniques.

La combustion du kérosène dans l'air provoque une élévation de température et donne lieu à la formation de certains produits de combustion.

Avant d'entreprendre toute étude expérimentale de la combustion de ce mélange d'hydrocarbures, il est nécessaire de connaître, théoriquement, les températures atteintes et les valeurs des concentrations des produits formés.

1,1 Le calcul de ces quantités n'est possible qu'en supposant par hypothèse la combustion idéale, c'est-à-dire adiabatique.

De plus, nous admettrons que :

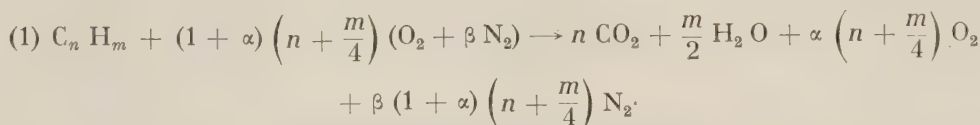
- la combustion se propage continûment dans une veine à pression constante;
- les gaz sont parfaits et les produits de combustion formés sont en équilibre à toute température;
- les températures de l'air et du combustible à l'entrée dans la veine de combustion sont constantes.

Enfin, nous supposerons pour simplifier les calculs que l'air est uniquement formé d'oxygène et d'azote dans les proportions 23,2 % de O_2 et 76,8 de N_2 . Quant au combustible kérosène, nous supposerons qu'il est constitué seulement de carbone et d'hydrogène avec une composition en poids 85,6 % de carbone et 14,4 % d'hydrogène.

1,2

COMBUSTION COMPLÈTE SANS DISSOCIATIONS MÉLANGES PAUVRES

1,2.1 En combustion complète, le kérosène brûle dans l'air suivant la réaction chimique :



On désigne par :

α , = l'excès d'air comburant;

β = 3,76 le nombre de molécules d'azote pour une molécule d'oxygène.

Le nombre total de moles de gaz brûlés formées dans la réaction (1) est :

$$(2) \quad \mathcal{N} = n + \frac{m}{2} + \alpha \left(n + \frac{m}{4} \right) + \beta (1 + \alpha) \left(n + \frac{m}{4} \right).$$

Si l'on considère des gaz parfaitement desséchés, le nombre total de moles devient :

$$(3) \quad \mathcal{N}' = \mathcal{N} - \frac{m}{2}.$$

Les concentrations des produits de combustion formés eau et anhydride carbonique sont :

$$(4) \quad a_{CO_2} \% = 100 \times \frac{n}{\mathcal{N}} \quad \text{et :} \quad (5) \quad a_{H_2O} \% = 100 \times \frac{m}{2 \mathcal{N}},$$

comme $n = \frac{m}{2}$, on a $a_{CO_2} = a_{H_2O}$ et il reste de l'oxygène en excès et de l'azote qui ne participent pas à la combustion :

$$(6) \quad a_{O_2} \% = 100 \times \frac{\alpha \left(n + \frac{m}{4} \right)}{\mathcal{N}} \quad (7) \quad a_{N_2} = 100 \times \frac{\beta (1 + \alpha) \left(n + \frac{m}{4} \right)}{\mathcal{N}}$$

Si les gaz brûlés sont desséchés et totalement dépourvus d'eau, $a_{H_2O} = 0$ et les titres des constituants du mélange sont :

$$(8) \quad a'_{CO_2} \% = a_{CO_2} \% \times \frac{\mathcal{N}}{\mathcal{N}'}, \quad \text{etc.}$$

Le rapport Air /Combustible :

$$(9) \quad \frac{A}{C} = \frac{(1 + \alpha) \left(n + \frac{m}{4} \right) (O_2 + \beta N_2)}{C_n H_m}$$

définit la richesse du mélange. Si $\alpha = 0$, la combustion a lieu en mélange stoechiométrique. En remplaçant n , m , β , C , H , O et N par leurs valeurs dans l'équation (9) on trouve :

$$(10) \quad \frac{A}{C} = (1 + \alpha) 14,70$$

la valeur du rapport Air / Combustible stoechiométrique est donc $(A/C)_{st} = 14,70$.

Le calcul des concentrations des constituants du mélange gazeux montre que celles-ci sont des fonctions de α [équations (2) et (4) (5) (6) (7)]; or, α est relié au rapport A/C par l'équation (10). Les concentrations peuvent donc être exprimées directement en fonction du rapport A/C et les relations ainsi établies sont de la forme :

$$(11) \quad a_{CO_2} \% = a_{H_2O} \% = 100 \times \frac{K_1}{K_2 \frac{A}{C} + K_3},$$

$$(12) \quad a_{O_2} \% = 100 \times \frac{K_4 \frac{A}{C} - K_5}{K_2 \frac{A}{C} + K_3}, \quad (13) \quad a_{N_2} \% = 100 \times \frac{K_6 \frac{A}{C}}{K_2 \frac{A}{C} + K_3}$$

et $K_1, K_2, K_3 \dots$ sont des constantes numériques.

Remarquons que nous avons :

$$(14) \quad \frac{M}{M'} = \frac{K_2 \frac{A}{C} + K_3}{K_2 \frac{A}{C} - K_3}.$$

La proportion de CO_2 formée croît et la concentration d'oxygène décroît avec la quantité de combustible utilisée. Pour cette raison, nous avons représenté la variation des concentrations des constituants du mélange en fonction du rapport C/A . On observe que la concentration de CO_2 varie linéairement avec le rapport C/A , sauf au voisinage du A/C stoechiométrique. Ce fait provient des valeurs numériques des constantes K_1, K_2, K_3 . L'équation (11) peut être écrite :

$$(15) \quad a_{CO_2} \% = 100 \times \frac{10,4}{5,049 \frac{A}{C} + 5,2} = \frac{100}{0,4855 \frac{A}{C} + 0,50},$$

ou :

$$a_{CO_2} \% = 205,9 \times \frac{C/A}{1 + 1,029 C/A}.$$

Or, dans le cas de certaines combustions à grande dilution d'air, les rapports A/C peuvent varier entre 40 et 150, ce qui correspond à des variations du rapport C/A de $6,6 \times 10^{-3}$ à 25×10^{-3} . Par suite, le dénominateur de l'expression (15) reste, dans cet intervalle, très voisin de l'unité. Nous pouvons donc poser :

$$(16) \quad a_{CO_2} \% = K \times \frac{C}{A}$$

pour des rapports A/C supérieurs à 40. Évidemment on trouve aussi une variation linéaire si l'on considère la quantité a'_{CO_2} (gaz secs).

Pour des commodités de définition, nous appellerons la quantité a'_{CO_2} formée en combustion complète CO_2 total. De même, la proportion d'oxygène a'_{O_2} restant après combustion complète s'appellera O_2 total.

1,2.2 L'élévation théorique de température provoquée par la combustion d'un mélange Air-Kérosène peut être calculée. Soit $A/C = z$ un rapport Air/Combustible donné. Dans 1 g de mélange on peut déterminer les concentrations $[C]$, $[O]$, $[H]$, $[N]$ en atomes-gramme/gramme de mélange des quatre sortes d'atomes participant à la combustion.

Après combustion nous avons en présence les constituants $e = [CO_2]$, $f = [H_2O]$, $g = [O_2]$, $h = [N_2]$ en atomes-gramme/gramme de mélange et la loi de la conservation de la matière nous permet d'écrire :

$$(17) \quad \begin{aligned} [C] &= e, & [H] &= 2f, \\ [O] &= f + 2e + 2g, & [N] &= 2h. \end{aligned}$$

Avant combustion le mélange possède une certaine chaleur initiale Q_I (préchauffage de l'air) et en fin de combustion la chaleur totale du mélange est :

$$(18) \quad e Q_{CO_2} + f Q_{H_2O} + Q_I = Q,$$

Q_{CO_2} et Q_{H_2O} étant les chaleurs de formation de l'anhydride carbonique et de l'eau.

Supposons que le mélange gazeux atteigne une certaine température T que nous choisirons arbitrairement; on doit, si la température T est bien choisie, avoir la relation :

$$(19) \quad \left(e \overline{C_{pCO_2}}^T_{300} + f \overline{C_{pH_2O}}^T_{300} + h \overline{C_{pN_2}}^T_{300} + g \overline{C_{pO_2}}^T_{300} \right) (T - 300) = Q,$$

$\overline{C_{pCO_2}}$, ... représentant les chaleurs spécifiques moyennes des différents constituants, entre 300 et $T^\circ K$, à pression constante, conformément aux hypothèses faites.

Évidemment, la valeur arbitraire choisie pour T n'est jamais exacte, et l'on trouve un écart $\pm \Delta Q$. Les valeurs des chaleurs spécifiques à la température T nous permettent d'écrire :

$$(20) \quad \frac{\pm \Delta Q}{e \overline{C_{pCO_2}}^T + f \overline{C_{pH_2O}}^T + h \overline{C_{pN_2}}^T + g \overline{C_{pO_2}}^T} = \pm \Delta T.$$

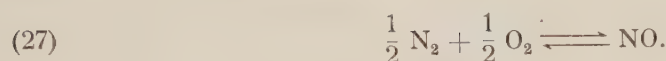
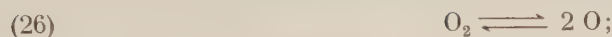
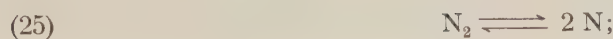
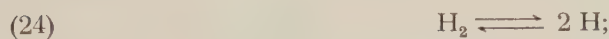
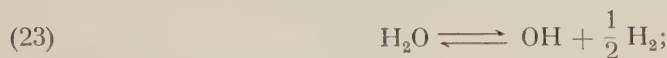
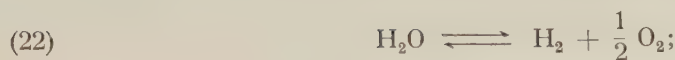
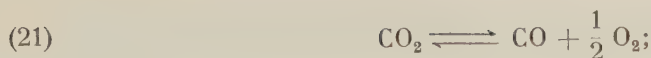
On en déduit la température théorique en combustion complète $T_1 = T \pm \Delta T$.

Ce mode de calcul des températures est assez rapide. Dû à HOPKINS [1] il exige un choix judicieux de la température T . Les calculs effectués montrent que la valeur maximum de la température T_1 apparaît lorsque le rapport A/C est stoechiométrique. Elle est de l'ordre de 2 400 à 2 600° K suivant les valeurs de la température de l'air à l'entrée dans la veine de combustion (de 80 à 300° C). Les températures atteintes, au voisinage du A/C stoechiométrique étant assez élevées, des dissociations peuvent se produire entre les différents constituants du mélange gazeux et les possibilités de dissociation doivent être envisagées.

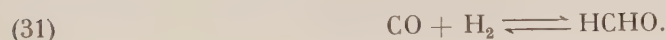
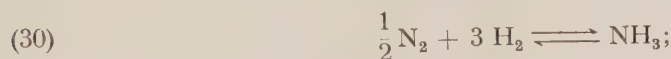
1,3

LES DISSOCIATIONS POSSIBLES

Nous nous trouvons en présence d'un mélange gazeux formé essentiellement de H_2O , CO_2 , N_2 et O_2 , et éventuellement, si la combustion est imparfaite, de CO et H_2 . Ces gaz portés à une certaine température T peuvent être le siège des réactions de dissociations suivantes :



Entre les différents produits de combustion formés, d'autres réactions peuvent prendre naissance :



Pour déterminer le rôle des réactions (21) à (31) il est nécessaire d'examiner les valeurs des constantes d'équilibre, et de tenir compte des températures et des concentrations des produits « permanents » de la combustion (CO_2 , H_2O , O_2 , N_2). On peut montrer que les réactions (28) à (31) interviennent peu, car elles ont lieu à partir de produits de combustion existant en faible proportion et provenant de dissociations antérieures. Elles peuvent donc être considérées comme du « deuxième ordre » et négligées provisoirement; d'ailleurs nous justifierons ce point de vue dans la suite.

Les réactions (21), (22) et (23) sont prépondérantes. Les valeurs des constantes d'équilibre [2], [3] montrent que ces réactions commencent vers 1 800° K. Il en est de même de la réaction (27) dont la constante d'équilibre croît assez rapidement avec la température; de plus, les proportions d'oxygène et d'azote en présence peuvent être importantes à certains rapports A/C et favoriser la formation du NO.

En ce qui concerne les réactions (24), (25) et (26), on peut examiner leur rôle en considérant le degré de dissociation [3]. Prenons, par exemple, l'équilibre :



lorsqu'une fraction θ d'une molécule de O_2 se décompose en 2 O il reste $1 - \theta$ molécules de O_2 , tandis que les θ molécules de O_2 décomposées forment 2θ molécules de O; le nombre total de molécules est $1 + \theta$. Or, les pressions partielles sont proportionnelles au nombre de molécules, et en appliquant la loi d'action des masses à cet équilibre on trouve :

$$(32) \quad \theta_{\text{O}_2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_p}{p}}.$$

A la pression de 1 atmosphère et pour $T = 2\,400^\circ \text{K}$:

$$\theta_{\text{O}_2} = 4,6 \times 10^{-3}.$$

Pour les équilibres (24) et (25) qui sont du même type on a :

$$\theta_{\text{N}_2} = 0,019 \times 10^{-3} \quad \text{et} \quad \theta_{\text{H}_2} = 8,5 \times 10^{-3}.$$

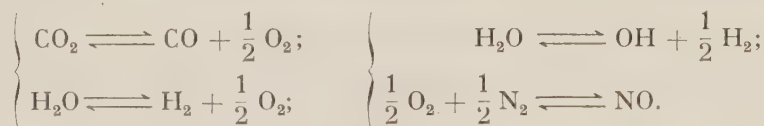
Le degré de dissociation est donc faible et ces réactions peuvent être négligées.

Cette approximation est légitime, car en effectuant un calcul semblable à titre de comparaison pour les réactions (21), (22) et (23) que nous avons considérées comme prépondérantes, on trouve, dans les mêmes conditions de température et de pression :

$$\theta_{\text{CO}_2} = 141 \times 10^{-3}, \quad \theta_{\text{H}_2\text{O}} = 42,5 \times 10^{-3}, \quad \theta_{\text{OH}} = 61,8 \times 10^{-3}.$$

Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que les précédentes.

En définitive, au cours de la combustion du kérosène dans l'air, quatre réactions de dissociation semblent susceptibles de se produire :



Nous limiterons l'étude des dissociations à ces réactions.

1,4 COMBUSTION EN TENANT COMPTE DES DISSOCIATIONS MÉLANGES PAUVRES

Le calcul des concentrations des divers produits de combustion O_2 , CO_2 , CO , H_2O , H_2 , OH , N_2 , NO et de la température T , soit neuf inconnues, implique la résolution d'un système de neuf équations qui sont :

— quatre équations décrivant la balance matérielle du système, une pour chaque sorte d'atome : carbone, oxygène, hydrogène et azote;

— quatre équations représentant la loi d'action des masses appliquée aux équilibres chimiques de dissociation;

— une équation représentant le bilan énergétique du système.

Du fait de la complexité du système d'équations, la résolution n'est possible qu'en procédant par approximations successives. Plusieurs méthodes ont été proposées [4], [5], [6]; celle que nous utiliserons est due à HOPKINS et BERENTHET [1], [7].

Désignons par $e = [\text{CO}_2]$, $f = [\text{H}_2\text{O}]$, $h = [\text{N}_2]$, $g = [\text{O}_2]$, $j = [\text{CO}]$, $l = [\text{H}_2]$, $s = [\text{OH}]$, $p = [\text{NO}]$, les concentrations en atomes-gramme/gramme de mélange des divers produits de combustion, la somme de ces concentrations étant égale à Σ . Les équations de la balance matérielle du système sont :

$$(33) \quad \left\{ \begin{array}{l} [\text{C}] = e + j; \\ [\text{O}] = 2e + j + f + 2g + s + p; \\ [\text{H}] = 2l + 2f + s; \\ [\text{N}] = 2h + p. \end{array} \right.$$

En supposant que la pression P , constante par hypothèse durant la combustion, est égale à une atmosphère, la loi d'action des masses appliquée aux équilibres chimiques (21), (22), (23) et (27) nous fournit les relations suivantes :

$$(34) \quad \frac{[\text{CO}] [\text{O}_2]^{1/2}}{[\text{CO}_2]} = K_C = K_{p\text{CO}_2} \left(\frac{\Sigma}{P} \right)^{1/2}$$

où :

$$(35) \quad \frac{e}{j} \times \left(\frac{\Sigma}{g} \right)^{1/2} = K_{\text{CO}_2} \quad \text{avec} \quad K_{\text{CO}_2} = \frac{1}{K_{p\text{CO}_2}},$$

et :

$$(36) \quad \frac{f}{l} \times \left(\frac{\Sigma}{g} \right)^{1/2} = K_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{en posant} \quad K_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1}{K_{p\text{H}_2\text{O}}},$$

$$(37) \quad \frac{f}{s} \times \left(\frac{\Sigma}{l} \right)^{1/2} = K_{\text{OH}}; \quad K_{\text{OH}} = \frac{1}{K_{p\text{OH}}},$$

$$(38) \quad p = (h \times g)^{1/2} \times K_{\text{NO}}; \quad K_{\text{NO}} = K_{p\text{NO}}.$$

Les valeurs des constantes d'équilibre à la pression de 1 atmosphère $K_{p\text{CO}_2}$, $K_{p\text{H}_2\text{O}}$, $K_{p\text{OH}}$, $K_{p\text{NO}}$ sont données dans des tables [2] en fonction de la température.

L'ensemble des équations (33) à (38) permet de déterminer les concentrations des différents constituants du mélange. Pour cela les concentrations p , s , l et j peuvent être considérées comme petites, comparativement aux concentrations e , f , g et h .

Ayant déterminé les concentrations e_1 , f_1 , g_1 , h_1 et la température T_1 en combustion complète, on suppose que l'intervention des dissociations provoque un abaissement de température $\Delta T'$ et l'on choisit arbitrairement une température $T'_2 = T_1 - \Delta T'$.

Admettons que e_1 , f_1 , g_1 et h_1 totalisant Σ_1 soient solutions des équations (34) à (37); on peut alors calculer :

$$(39) \quad j_1 = \frac{e_1}{K_{\text{CO}_2}} \left(\frac{\Sigma_1}{g_1} \right)^{1/2};$$

$$(40) \quad l_1 = \frac{f_1}{K_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{\Sigma_1}{g_1} \right)^{1/2};$$

$$(41) \quad s_1 = \frac{f_1}{K_{\text{OH}}} \left(\frac{\Sigma_1}{l_1} \right)^{1/2};$$

$$(42) \quad p_1 = K_{\text{NO}} (h_1 \times g_1)^{1/2},$$

les constantes d'équilibre étant prises à la température T'_2 . Connaissant j_1 , l_1 , s_1 et p_1 on corrige les valeurs e_1 , f_1 , g_1 , h_1 supposées exactes en écrivant que :

$$(43) \quad \begin{cases} e_2 = [\text{C}] - j_1; \\ f_2 = [\text{H}] - 2 l_1 - s_1; \end{cases} \quad \begin{cases} g_2 = \frac{1}{2} ([\text{O}] - 2 e_2 - f_2 - j_1 - s_1 - p_1); \\ h_2 = \frac{1}{2} ([\text{N}] - p_1). \end{cases}$$

A partir des valeurs e_2 , f_2 , g_2 , h_2 ainsi obtenues, on calcule l_2 , j_2 , s_2 , p_2 et l'on poursuit le calcul jusqu'à ce que :

$$(44) \quad s_n \simeq s_{n-1}, \quad p_n \simeq p_{n-1}, \quad j_n \simeq j_{n-1}, \quad l_n \simeq l_{n-1}.$$

La convergence des valeurs est assez rapide et n est de l'ordre de 3 à 6.

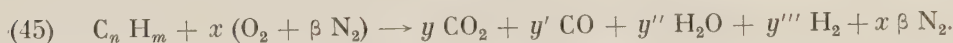
Les concentrations étant ainsi déterminées, on calcule la température de combustion en effectuant le bilan énergétique du système, comme précédemment (§ 1,2.2) mais en tenant compte de tous les constituants du mélange.

On calcule $\pm \Delta Q$ et $\pm \Delta T$ et l'on en déduit $T_2 = T'_2 \pm \Delta T$.

1,5

COMBUSTION EN MÉLANGE RICHE

1,5.1 Si le mélange Air /Combustible est riche, la réaction chimique de combustion du kérosène prend la forme :



Au sein du mélange gazeux on peut admettre que les quantités de CO, CO₂, H₂O et H₂ sont en équilibre suivant la réaction :



Cet équilibre est indépendant de la pression. En appliquant la loi d'action des masses à cet équilibre et en utilisant les notations précédentes, on a :

$$(47) \quad \frac{j f}{e l} = \frac{K_{H_2O}}{K_{CO_2}} = K_0.$$

Pour un rapport A /C donné les concentrations g , s et p peuvent être considérées comme très faible du fait de l'excès de combustible et du manque d'oxygène. En première approximation on peut donc calculer seulement e , f , j , l et h ; ces concentrations correspondent aux produits permanents de la combustion riche, c'est-à-dire à une combustion sans dissociation.

Les équations « réduites » de la balance matérielle du système sont alors :

$$(48) \quad \left\{ \begin{array}{l} [C] = e + j; \\ [O] = 2e + f + j; \\ [H] = 2f + 2l; \\ [N] = 2h. \end{array} \right.$$

En remplaçant dans l'équation (47) les valeurs de f , j , l provenant des relations (48) on trouve :

$$(49) \quad K_0 = \frac{([C] - e) ([O] - [C] - e)}{e \left(\frac{[H]}{2} - [O] + [C] + e \right)}.$$

Cette équation du second degré en e possède une racine positive e_1 , en prenant pour la constante K_0 la valeur numérique à la température T arbitrairement choisie.

A partir de e_1 on calcule j_1 , f_1 , l_1 , h_1 et l'on effectue comme précédemment le bilan énergétique du système qui détermine $T_1 = T \pm \Delta T$.

On connaît ainsi les concentrations e_1, f_1, l_1, h_1, j_1 totalisant Σ_1 , des constituants du mélange gazeux et la température T_1 de combustion sans dissociation.

1,5.2 Pour déterminer les concentrations en tenant compte des dissociations, on suppose que les concentrations calculées en combustion complète sont solution des équations (36), (37), (38) donnant g, s, p :

$$(50) \quad g_1 = \left(\frac{f_1}{l_1}\right)^2 \times \frac{\Sigma_1}{K_{H_2O}^2};$$

$$(51) \quad p_1 = \frac{h_1^{1/2} \times f_1}{l_1} \times \frac{K_{NO}}{K_{H_2O}} \times \Sigma_1^{1/2};$$

$$(52) \quad s_1 = \frac{f_1}{K_{OH}} \times \left(\frac{\Sigma_1}{l_1}\right)^{1/2};$$

les constantes d'équilibre étant prises à la température $T = T_1 - \Delta T'$. Si nous reprenons les équations générales (33) elles doivent être corrigées des quantités :

$$(53) \quad \begin{cases} [C]' = [C] = e_2 + j_2; \\ [O]' = [O] - (2g_1 + s_1 + p_1) = 2e_2 + f_2 + j_2; \\ [H]' = [H] - s_1 = 2f_2 + 2l_2; \\ [N]' = [N] - p_1 = 2h_2, \end{cases}$$

et :

$$(54) \quad \frac{j_2 f_2}{e_2 l_2} = K_O.$$

Les solutions de ces équations sont e_2, f_2, l_2, h_2, j_2 à partir desquelles on peut calculer g_2, s_2, p_2 . On poursuit le calcul par approximations successives jusqu'au $n^{\text{ième}}$ stade tel que :

$$g_{n-1} \simeq g_n, \quad s_{n-1} \simeq s_n, \quad p_{n-1} \simeq p_n.$$

Les concentrations des divers produits de combustion en équilibre permettent de déterminer la température $T_2 = T \pm \Delta T$ en dressant le bilan énergétique total du système.

1,6

RÉSULTATS

L'utilisation de ces méthodes de calcul conduit aux résultats suivants :

1,6.1 Températures : A la pression de 1 atmosphère et pour une température d'entrée de l'air constante de 80° C, les températures en combustion complète augmentent quand le A/C diminue (mélanges pauvres), la valeur maximum 2 500° K apparaît pour le rapport A/C stoechiométrique (fig. 1). Pour les mélanges riches la température décroît en même temps que le A/C. L'effet des dissociations s'exerce pour des rapports A/C compris entre 11 et 34, l'abaissement maximum de température est de 168° au A/C stoechiométrique.

Les deux facteurs, pression et température de l'air, à l'entrée, influencent différemment la température finale de combustion :

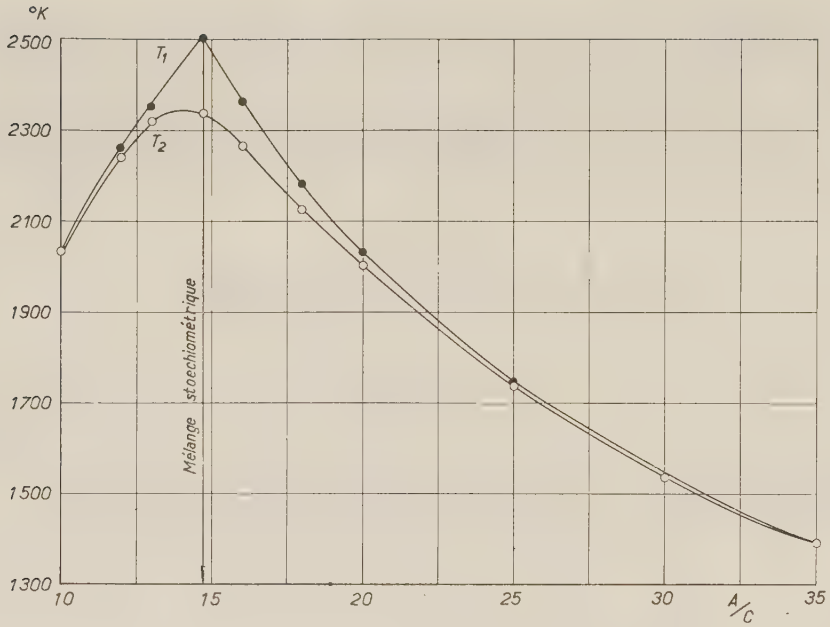


Fig. 1. — Températures théoriques de combustion des mélanges Air-Kérosène.

T_1 ● sans dissociation — T_2 ○ avec dissociation.
(pression constante : 1 atmosphère) (air préchauffé à 80° C.).

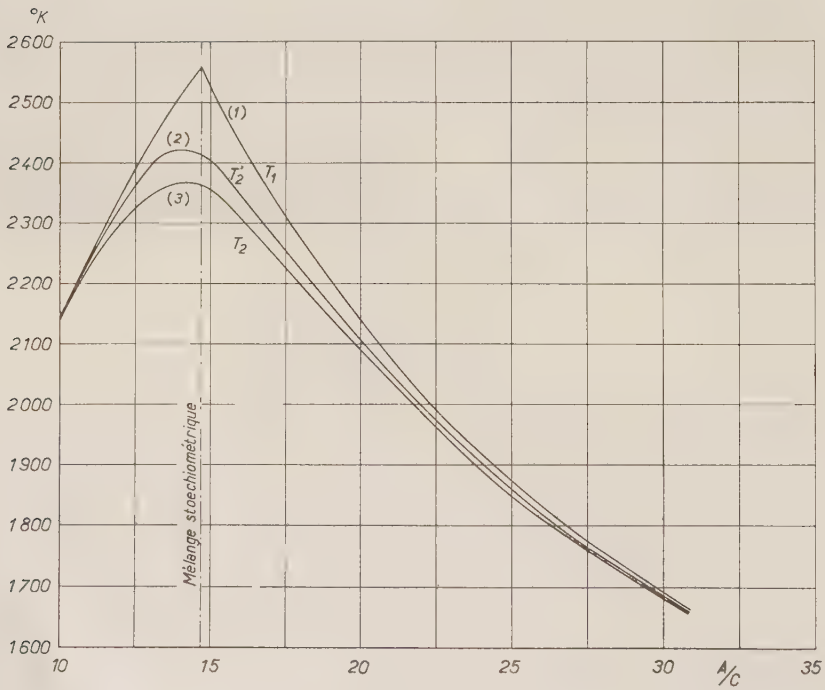


Fig. 2. — Températures théoriques de combustion des mélanges air-Kérosène.

(1) T_1 sans dissociation. — (2) T_1' avec dissociation (Pression 5 atmosphères)
(3) T_2 avec dissociation (Pression 1 atmosphère) (air préchauffé à 300° C.)

a) un accroissement de la pression gêne les réactions de dissociation (35) à (37), seul l'équilibre chimique (38) indépendant de la pression n'est pas affecté. De ce fait, les concentrations des produits de dissociation sont considérablement plus petites et la température finale de combustion plus élevée;

b) si l'on accroît la température d'entrée de l'air la dissociation augmente à toute pression et pour tous les rapports A/C. Aussi l'accroissement de température de l'air ne se retrouve que partiellement sur la température finale de combustion.

A des pressions de 1 et 5 atmosphères et pour une température d'entrée de l'air de 300° C, les courbes (*fig. 2*) dues à BERENTHET [7] montrent la variation des températures en fonction du rapport A/C.

La comparaison de ces résultats, avec ceux obtenus dans les conditions ($P = 1$ at, t° C de l'air à l'entrée = 80) (*fig. 1*), illustre l'influence des facteurs pression et température.

1,6.2

Concentrations des produits de combustion

Nous examinerons successivement les divers produits de combustion formés :

— CO : la concentration en CO d'abord négligeable pour des rapports A/C élevés devient notable à partir de $A/C = 20$ (température correspondante 2 000° K). La quantité de CO formée croît ensuite très rapidement (1,50 % au rapport A/C stoechiométrique). Elle continue d'augmenter au delà du $(A/C)_{st}$ par suite de la formation de CO de combustion (*fig. 3*);

— CO₂ : l'anhydride carbonique, produit permanent de la combustion du kérosène, est en proportion d'autant plus élevée que la quantité de combustible utilisée est plus grande. Mais ceci n'est exact que jusqu'au rapport A/C stoechiométrique; pour des rapports A/C plus riches il se forme du CO de combustion aux dépens du CO₂ et la concentration de ce dernier décroît (*fig. 4*);

— NO : du fait de la valeur élevée de la constante d'équilibre K_{NO} [2], [3], la quantité de NO formée (*fig. 3*) est encore notable pour des rapports A/C de l'ordre de 35, où la concentration des autres produits de dissociation peut être considérée comme négligeable. La teneur en NO croît constamment avec la température, c'est-à-dire avec la quantité de combustible utilisée jusqu'à $A/C = 18$. A partir de cette valeur la proportion de NO diminue car malgré la température élevée, il n'y a plus suffisamment d'oxygène pour que la réaction se produise dans de bonnes conditions;

— H₂ : la quantité de H₂ formée commence à devenir appréciable à partir de $A/C = 18$ (température 2 123° K) et elle croît ensuite constamment avec la richesse en combustible (*fig. 3*);

— OH : même aux rapports A/C pauvres la concentration OH est assez importante vis-à-vis des autres produits de dissociation. La concentration maximum est atteinte au A/C stoechiométrique, et elle décroît de part et d'autre de cette valeur (*fig. 3*);

— O₂ et N₂ : les concentrations en oxygène et azote diminuent constamment avec le rapport A/C. La quantité d'oxygène est nulle lorsque le rapport A/C est stoechio-

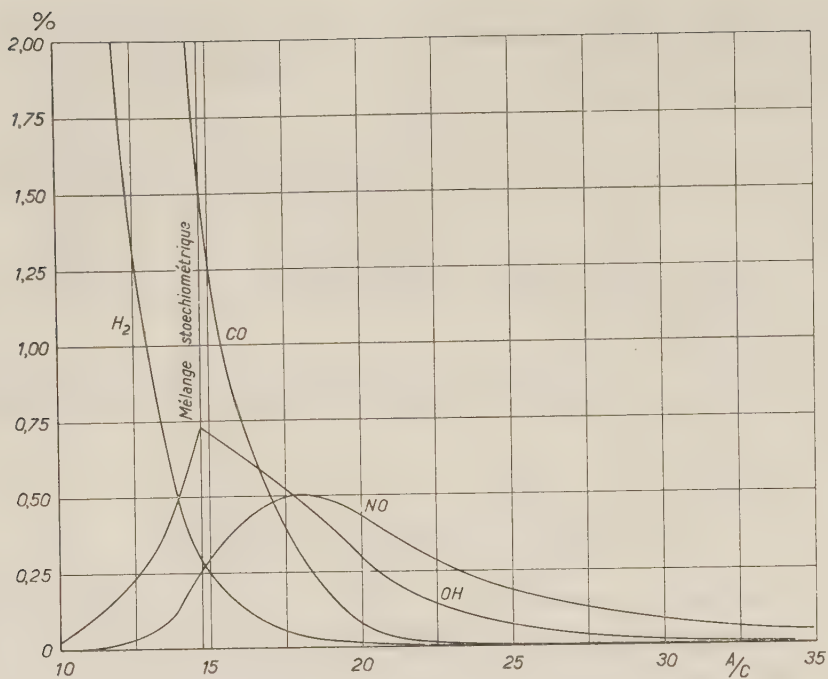


Fig. 3. — Concentrations théoriques de CO , NO , OH , H_2 .
Pression 1 atmosphère air préchauffé : $80^\circ C$

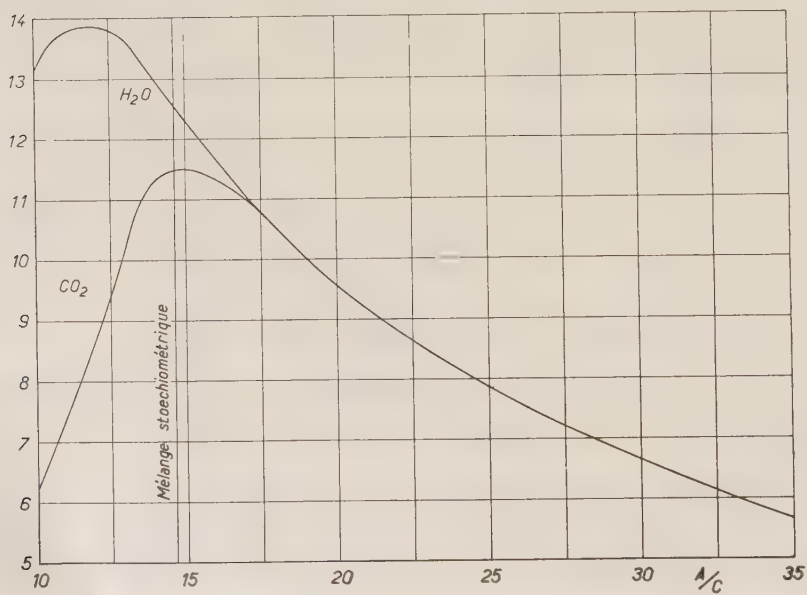


Fig. 4. — Concentrations de CO_2 et H_2O calculées en tenant compte des dissociations.

métrique, dans le cas d'une combustion complète sans dissociations. S'il existe des dissociations, la concentration en O_2 devient nulle pour un rapport A/C plus riche et égal à 12;

— H_2O : la quantité de vapeur d'eau formée est à peu près identique à la quantité de CO_2 tant que les concentrations en OH et H_2 ne sont pas notables. La concentration en H_2O croît avec la quantité de combustible utilisée jusqu'à un rapport A/C plus riche que le stoechiométrique, puis décroît (*fig. 4*).

1,6.3 Possibilité de formation d'autres produits de combustion

Nous avons signalé (§ 1,3) que certaines réactions pouvaient se produire à partir des différents produits de combustion formés. Nous n'avons pas tenu compte de ces équilibres et nous avons admis que leur rôle était négligeable. On peut, ainsi, justifier ce point de vue (voir BERENTHET [7]) :

a) FORMATION DE MÉTHANE.

La loi d'action des masses appliquée à l'équilibre (29) donne, en utilisant les notations habituelles :

$$(55) \quad [CH_4] = \frac{j^2 l^2}{e} \left(\frac{\Sigma}{P} \right)^2 \times \frac{1}{K_p}.$$

A 2 000° K, $K_p \simeq 10^8$, et, sauf dans les mélanges riches $j \ll e$ et $l \ll e$, donc la quantité de méthane peut être considérée comme négligeable.

b) DÉPÔT DE CARBONE.

Le carbone ne peut être formé à partir de la réaction (28) que si le rapport des pressions partielles du CO au CO_2 excède la valeur de la constante d'équilibre à la température considérée. Pour les mélanges pauvres $p_{CO} \ll p_{CO_2}$, donc le carbone ne se déposera que si la concentration en CO est élevée, c'est-à-dire pour des mélanges où le combustible est en grand excès.

c) FORMATION D'ALDÉHYDE FORMIQUE.

Ce composé peut apparaître par union de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène. Il a déjà été détecté dans les produits froids de certaines combustions [8], [9], [10]. La loi d'action des masses appliquée à l'équilibre (31) donne :

$$(56) \quad [HCHO] = K_p \times j l \left(\frac{P}{\Sigma} \right).$$

Nous avons vu que $l \ll j$ et $j \ll 1$, donc la quantité d'aldéhyde formique qui peut se former est très faible.

On trouve à 2 000° K, pour $A/C = 20$ (mélange pauvre) $HCHO \% \simeq 10^{-9}$ et pour $A/C = 10$ (mélange riche) $HCHO \% \simeq 6 \times 10^{-7}$.

L'aldéhyde formique ne peut donc exister qu'à l'état de traces dans les gaz de combustion.

d) FORMATION D'AMMONIAC.

L'équilibre (30) peut donner lieu à la formation d'ammoniac. On a :

$$(57) \quad [NH_3] = K_p h^{1/2} l^{3/2} \times \left(\frac{P}{\Sigma} \right).$$

En utilisant les valeurs de l , h et Σ calculées pour $T = 2\,000^\circ K$, et en prenant la valeur de $K_{p_{NH_3}}$ à cette température, on obtient pour :

$$\begin{aligned} \frac{A}{C} = 20, \quad NH_3 \% &\simeq 2 \times 10^{-7} \\ \frac{A}{C} = 10, \quad NH_3 \% &\simeq 7 \times 10^{-5}. \end{aligned}$$

La concentration en ammoniac est donc extrêmement faible.

1,7

RENDEMENTS DE COMBUSTION

Les données théoriques, sur la combustion du kérosène dans l'air que nous venons d'exposer, calculées d'après une méthode due à HOPKINS et BERENTHET [1], [7], nous permettent de fixer approximativement les concentrations et les températures en combustion réelle. Il est bien légitime de parler d'approximations, car les hypothèses faites à la base de ces calculs (§ 1,1) limitent l'intérêt pratique des résultats obtenus.

Nous avons supposé une combustion idéale et adiabatique; or, une partie de la chaleur est dissipée par rayonnement; le mélange Air/Combustible n'est pas parfait, une partie du combustible brûle en mélange riche, l'autre en mélange pauvre, il y a donc une distribution non uniforme de la température. Enfin, la combustion n'est pas parfaite et l'équilibre chimique des réactions n'est vraisemblablement pas atteint.

Pour ces raisons, il convient d'introduire la notion de rendement thermique η de combustion. Les diverses définitions du rendement ont été précisées par M. Roy [11]. C'est le rapport :

$$(58) \quad \eta = \frac{\Gamma'}{\Gamma}$$

du pouvoir calorifique Γ' de la combustion effectivement réalisée au pouvoir calorifique Γ de la combustion complète. Il s'agit, évidemment, de pouvoirs calorifiques inférieurs à pression constante, rapportés à l'unité de masse du mélange.

L'évaluation du numérateur de l'expression (58) exige la définition, dans la veine de combustion considérée, de sections conventionnelles d'entrée (0) — état du mélange

avant combustion — et de sortie (3) — état du mélange après combustion — ainsi que la connaissance de l'état chimique du mélange dans la section (3).

1,7.1 La connaissance de l'état chimique des gaz brûlés n'est pas indispensable, car on peut exprimer Γ' à partir de variations d'enthalpie avec la température, en calculant l'enthalpie dans la section de sortie pour des gaz provenant de la combustion complète. On peut montrer [12] que l'erreur commise dans ce cas est négligeable.

Le rendement s'écrit :

$$(59) \quad \eta = \frac{H_3 - H_0}{\Gamma},$$

H_3 représente l'enthalpie des gaz brûlés dans la section de sortie à la température d'arrêt T_3 et H_0 l'enthalpie du mélange Air/Combustible dans la section d'entrée à la température d'arrêt T_0 .

Si l'on remarque que :

$$(60) \quad H_3 - H_0 = \bar{C}_{p0}^3 (T_3 - T_0),$$

$\bar{C}_{p0}^3$ étant la chaleur spécifique moyenne entre les états (0) et (3) à pression constante, on a alors :

$$(61) \quad \eta = \frac{\bar{C}_{p0}^3 (T_3 - T_0)}{\bar{C}_{p0}^1 (T_1 - T_0)},$$

T_1 étant la température qui serait théoriquement atteinte si la combustion était complète

Si le rendement est bon T_3 et T_1 sont voisins et le rapport $\frac{\bar{C}_{p0}^3}{\bar{C}_{p0}^1}$ est voisin de l'unité.

Par suite, on écrit :

$$(62) \quad \eta_t = \frac{(T_3 - T_0)}{(T_1 - T_0)} = \frac{\Delta T \text{ réel}}{\Delta T \text{ théorique}}.$$

En adoptant cette définition approchée du rendement on commet une erreur systématique [12] égale à

$$\eta_t - \eta < 0,07 (1 - \eta)$$

qui peut être généralement négligée.

1,7.2 Une autre définition du rendement est basée sur des données chimiques. La détermination de tous les imbrûlés existant dans la section de sortie étant assez délicate, le rendement peut être exprimé par le rapport de la quantité de CO_2 existant réellement dans les gaz issus de la combustion à la quantité de CO_2 qui devrait exister si la combustion était complète :

$$(63) \quad \eta_c = \frac{\text{CO}_2 \text{ réel}}{\text{CO}_2 \text{ total}}.$$

La quantité CO_2 total a été définie précédemment (§ 1,2).

Cette expression du rendement provient de considérations logiques sur la com-

bustion. La comparaison de cette définition approchée du rendement avec la définition exacte (58) a été faite par A. QUILLÉVÉRÉ [12]. On peut montrer que :

$$(64) \quad (\eta - \eta_c) = (1 - \eta) (\pm 0.06 + 1,1 \mu_{CO} - \mu_{H_2}),$$

en désignant par μ_{CO} et μ_{H_2} les fractions des pertes dues à l'oxyde de carbone et à l'hydrogène. La perte totale π est donnée par :

$$\pi = 1 - \eta$$

et nous avons :

$$\mu_{CO} = \frac{\pi_{CO}}{\pi}, \quad \mu_{H_2} = \frac{\pi_{H_2}}{\pi}.$$

En adoptant la définition de η_c pour mesurer le rendement de combustion, on commet une erreur qui est liée à la nature et à la concentration des différents imbrûlés. On néglige la perte due à l'hydrogène et l'on suppose que tous les autres imbrûlés ont un pouvoir calorifique égal à $\frac{\Gamma}{n}$ par atome de carbone.

Avec les hydrocarbures usuels, et en particulier le kérosène, pour des rendements assez bons μ_{CO} et μ_{H_2} sont du même ordre (0,1 à 0,2). De ce fait, l'erreur commise est généralement telle que :

$$\eta - \eta_c < 0,1 (1 - \eta).$$

1,7.3 L'élévation théorique de température produite par la combustion d'un mélange Air-Kérosène a été calculée précédemment. Nous avons vu que la température atteinte en combustion complète est une fonction du rapport C/A. On peut montrer [12] que le ΔT théorique varie linéairement avec le C/A sauf au voisinage du rapport stoechiométrique. Par suite on peut poser :

$$\Delta T \text{ théorique} = K' \frac{C}{A}$$

pour des rapports A/C compris entre 40 et 150.

L'équation (62) définissant le rendement η_t peut donc s'écrire :

$$(65) \quad \Delta T \text{ réel} = \eta_t \quad \Delta T \text{ théorique} = K' \frac{C}{A} \eta_t.$$

A partir de l'équation (15) la relation (63) prend la forme :

$$(66) \quad CO_2 \text{ réel} = \eta_c \quad CO_2 \text{ total} = \eta_c K \frac{C}{A}.$$

En comparant les équations (65) et (66) on trouve :

$$\frac{CO_2 \text{ réel}}{\Delta T \text{ réel}} = \frac{K}{K'} \frac{\eta_c}{\eta_t}$$

et si l'on néglige les erreurs introduites par les définitions approchées des deux rendements η_t et η_c on a :

$$(67) \quad CO_2 \text{ réel} = K'' \Delta T \text{ réel} \quad \text{avec} \quad K'' = \frac{K}{K'}$$

La concentration en CO_2 existant effectivement dans les gaz de combustion varie donc linéairement avec l'élévation réelle de température.

1,8 L'ensemble des données théoriques sur la combustion du kérosène dans l'air que nous venons d'examiner nous permet de définir les quantités à mesurer expérimentalement pour déterminer l'état d'une combustion.

Il est indispensable de connaître les quantités d'air A et de combustible C utilisées dans la combustion pour déterminer à partir des courbes établies, la température T_1 et les concentrations des constituants du mélange en combustion complète.

L'analyse des gaz de combustion est indispensable. La détermination de tous les constituants du mélange gazeux serait souhaitable. Mais il est illusoire d'envisager un appareil qui permettrait une analyse rigoureusement complète. Aussi, les possibilités de l'analyse des gaz étant restreintes, nous nous limiterons au dosage des produits de combustion les plus intéressants qui sont :

— l'anhydride carbonique, dont la concentration permet de calculer le rendement η_c . Il résulte de l'oxydation normale des atomes de carbone et représente spécifiquement l'état de la combustion;

— l'oxyde de carbone. La proportion de CO contenue dans les gaz de combustion est l'indice d'une combustion bonne ou mauvaise;

— l'oxygène. La quantité d'oxygène restant après combustion permet d'apprécier la richesse du mélange;

— l'oxyde nitrique. Il occupe vis-à-vis des autres produits de dissociation une place particulière et sa présence doit être recherchée.

Les températures, T_3 des gaz après combustion et T_0 de l'air avant combustion, doivent être repérées. La connaissance de ces températures permet de calculer η_i et d'établir la liaison concentrations-températures.

La mesure des quantités ainsi définies implique le choix ou la réalisation de méthodes de mesure appropriées qui seront décrites dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

LES MÉTHODES DE MESURE

2,1 La combustion du kérosène sera étudiée expérimentalement dans le foyer où ce carburant est habituellement utilisé : une chambre de turboréacteur. La conception de ce foyer nous a conduit à rechercher une méthode d'analyse des gaz qui permette d'effectuer de nombreuses mesures avec le maximum de précision. Aussi, l'emploi d'un analyseur de gaz continu nous a semblé préférable, car il apporte une rapidité de mesure supérieure aux appareils discontinus (analyse d'un échantillon gazeux contenu dans une ampoule).

Le dosage continu des divers constituants d'un mélange gazeux peut être réalisé en utilisant l'absorption globale du rayonnement infra-rouge par les gaz. Sur ce principe quelques appareils ont été créés [13], [14], [15], [16]. Parmi eux figure l'analyseur O. N. E. R. A. T. 80, mis au point par K. LUFT [17], [18], que nous avons utilisé, et dont nous rappellerons succinctement le fonctionnement [19].

2,1.1 L'appareil permet, par absorption infra-rouge sans décomposition spectrale, de mesurer la concentration d'un constituant h dans un mélange gazeux. On mesure l'affaiblissement que subit le rayonnement d'une source infra-rouge en traversant le mélange gazeux à analyser. On utilise comme récepteur du rayonnement un volume limité du gaz h à doser dans le mélange et l'on mesure de manière convenable l'échauffement de ce volume gazeux.

2,1.2 Cet analyseur convient bien à nos besoins, car il possède de nombreux avantages : analyse continue, bonne sensibilité, sélectivité des mesures, temps de réponse faible.

En faisant varier la longueur des tubes d'absorption de 1 à 200 mm on peut mesurer, par exemple, des concentrations de CO_2 depuis 100 % jusqu'à $10^{-4}\%$. Dans la plupart des cas, sans précautions spéciales, une précision de ± 1 à 2 % de l'échelle totale de la mesure peut être obtenue. Le temps de réponse de l'appareil ne dépend que du renouvellement des gaz dans la chambre d'analyse, le temps de réponse électrique n'étant que d'une seconde environ.

La sélectivité de l'appareil, excellente dans la majorité des cas, se trouve limitée s'il y a chevauchement des bandes d'absorption des constituants du mélange; il en est

ainsi pour certains hydrocarbures. Enfin l'analyseur ne peut être utilisé pour le dosage des gaz élémentaires O_2 , H_2 , N_2 qui ne possèdent pas de bandes d'absorption dans l'infra-rouge.

Au moyen de cet appareil, nous avons mis au point une méthode d'analyse des gaz de combustion.

2,2

MÉTHODE D'ANALYSE DES GAZ

2,2.1 Le principe de la méthode consiste à mesurer alternativement les concentrations en CO_2 , CO , etc., existant réellement dans les gaz, et la quantité de CO_2 qui devrait exister si la combustion était totale et parfaite [20], [21].

Les gaz d'échappement du foyer étudié, prélevés au moyen d'une sonde, alimentent deux circuits indépendants (fig. 5). Le CO_2 réel et les imbrûlés sont dosés directe-

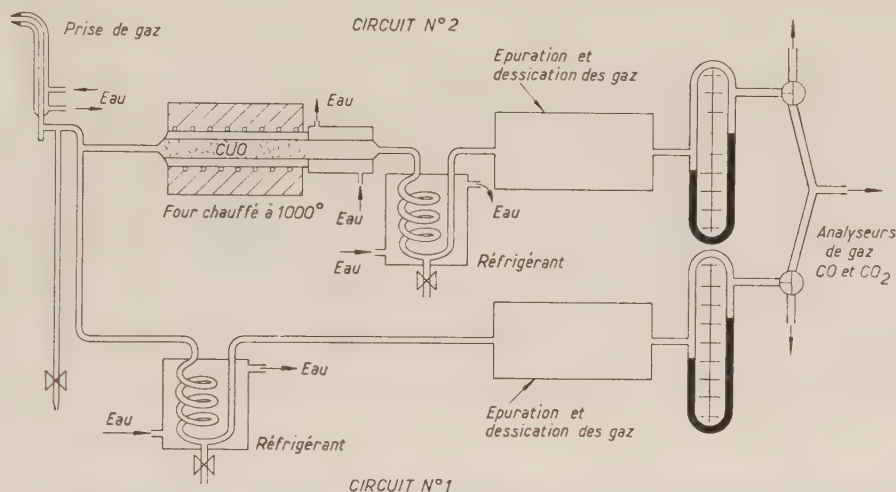


Fig. 5. — Schéma du dispositif d'analyse des gaz.

ment dans les gaz d'échappement (circuit n° 1) tandis que pour mesurer le CO_2 total, on réalise préalablement la combustion des imbrûlés dans un four électrique (circuit n° 2) chauffé à 1 000° C.

Après un refroidissement convenable, les gaz provenant des deux circuits traversent des appareils où ils sont épurés et desséchés (fig. 6). Puis ils aboutissent à un dispositif permettant d'envoyer dans les analyseurs de gaz infra-rouge, soit les gaz du circuit n° 1, soit ceux du circuit n° 2. Simultanément, les gaz du circuit non utilisé s'échappent dans l'atmosphère.

L'ensemble de ce dispositif donne donc deux circuits parcourus, l'un par des gaz tels qu'ils sont au lieu de prélèvement, l'autre par des gaz résultant de l'oxydation complète des premiers. Ils débitent continuellement et parviennent aux analyseurs infra-rouge en un temps de réponse minimum.

2.2.2 Cette méthode d'analyse présente les caractéristiques suivantes :

a) le four électrique doit être placé le plus près possible du lieu de prélèvement des gaz afin de récupérer les imbrûlés liquides ou condensables. Si le four était trop éloigné du lieu de prélèvement, ces imbrûlés risqueraient de se déposer dans les canalisations et la valeur mesurée CO_2 total serait inexacte. La transformation des imbrûlés en CO_2 a lieu dans un tube en acier inoxydable (45 cm de longueur $\times$ 2,6 cm de diamètre) contenant de la tournure de cuivre oxydée; l'oxygène non utilisé au cours de la combustion dans le foyer étudié permet la transformation des imbrûlés en CO_2 . Le tube est chauffé à la température de 1 000° C pour que l'oxydation de tous les imbrûlés soit rapide.

Pour obtenir l'oxydation complète des imbrûlés dans le four, on a limité le débit des gaz sur le circuit n° 2 à 35 cc/s environ. A la sortie du four le tube est entouré d'une

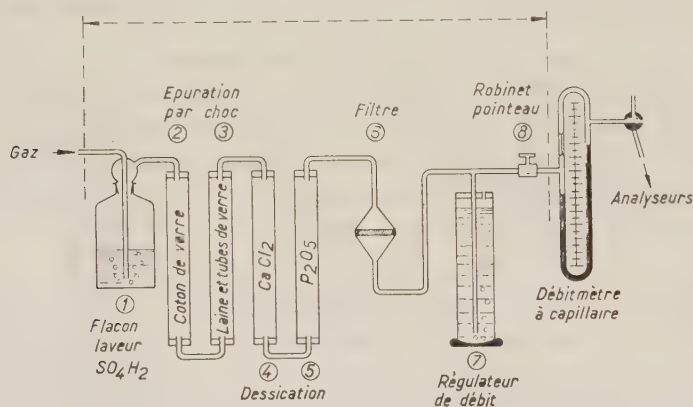


Fig. 6. — Schéma des systèmes chimiques d'épuration des gaz.

circulation d'eau froide (fig. 5) pour provoquer une chute rapide du gradient de température et « figer » les équilibres chimiques établis;

b) les réfrigérants placés sur chacun des circuits sont parfaitement classiques. Ce sont des serpentins en tube de cuivre autour desquels circule un courant d'eau. Ces réfrigérants ont pour rôle de condenser la vapeur d'eau contenue dans les gaz de combustion. L'eau condensée est recueillie dans un volume placé au point bas des serpentins;

- c) les appareils chimiques (fig. 6) installés sur chaque circuit sont destinés à :
- débarrasser les gaz des particules solides qu'ils renferment;
 - dessécher soigneusement les gaz en absorbant l'excès de vapeur d'eau qui n'a pas été condensée dans les réfrigérants. L'élimination totale de la vapeur d'eau est indispensable, car très absorbante dans l'infra-rouge elle risquerait d'introduire dans l'analyseur une absorption supplémentaire qui aurait pour conséquence de fausser les mesures.

La constitution de ces appareils chimiques est précisée sur la figure 6.

Après épuration et dessiccation, les gaz parviennent à une fuite à pression constante (tube plongeant dans une éprouvette remplie d'eau). Un robinet-pointeau permet de régler et de limiter la quantité de gaz envoyée dans les analyseurs, qui est mesurée par un débitmètre à capillaire;

d) les gaz provenant des deux circuits aboutissent donc, en définitive, à deux débitmètres à capillaire. Ces deux débitmètres sont disposés de façon telle que, par le jeu de deux robinets trois voies (fig. 5), on puisse envoyer dans les analyseurs soit les gaz du circuit n° 1, soit les gaz du circuit n° 2 en un intervalle de temps très court. Simultanément, les gaz du circuit non utilisé s'échappent dans l'atmosphère;

e) la circulation des gaz dans l'ensemble de l'appareillage est assurée, par la pression dynamique, lorsque le foyer étudié est une chambre de turboréacteur. Dans ce cas, on dispose à la sortie de la sonde de prise de gaz d'un débit beaucoup trop élevé. Aussi, pour régler la vitesse de circulation des gaz dans l'appareillage, on a installé une fuite commandée par un robinet-pointeau P à réglage fin (fig. 5). Lorsque ce robinet est ouvert aucun gaz ne circule dans l'appareil; en le fermant progressivement, on règle le débit gazeux de manière qu'un léger excès de gaz s'échappe par les deux fuites à pression constante, placées sur chacun des circuits.

Si les gaz de combustion ne possèdent pas une pression dynamique suffisante, on doit, pour assurer un débit gazeux convenable, utiliser des pompes de circulation. Pour cela, nous avons réalisé des pompes munies d'une membrane et d'un dispositif de clapets en caoutchouc synthétique. Ces pompes, fonctionnant à sec, ne risquent pas de modifier la nature chimique du mélange gazeux. Si leur emploi s'avère nécessaire, on monte une pompe sur chaque circuit d'analyse entre les réfrigérants et les appareils chimiques. Ainsi, les gaz de combustion sont aspirés à travers la sonde de prélèvement, le four et les réfrigérants, et refoulés vers les appareillages chimiques. En choisissant cet emplacement sur chacun des circuits on évite, en grande partie, des condensations de vapeur d'eau dans les pompes; de plus, les imbrûlés parviennent au four d'oxydation sans risques de transformation.

2,2,3 L'appareillage que nous venons de décrire a été réalisé pratiquement en trois parties distinctes :

— une table mobile, placée à proximité du foyer de combustion étudié, supporte la prise de gaz, les réfrigérants et le four ;

— un banc de mesure qui comprend : les appareils chimiques, les deux débitmètres à capillaire avec le dispositif de robinets trois voies, les analyseurs infra-rouge équipés des millivoltmètres permettant de mesurer les concentrations, et divers instruments de contrôle.

Un châssis mobile supporte le groupe de pompage (pompes et moteur électrique d'entraînement). Cet ensemble aisément déplaçable n'est utilisé que si la pression dynamique des gaz est insuffisante pour assurer l'alimentation de l'appareillage d'analyse.

2,2,4 Les gaz de combustion sont prélevés au moyen d'une sonde constituée par un tube de 2,6 mm de diamètre en acier inoxydable, entouré de deux tubes concentriques entre lesquels circule un courant d'eau. La circulation d'eau assure au métal une meilleure

tenue et provoque un refroidissement brutal des gaz. Ainsi, des gaz prélevés à la température de 800° C ont, à la sortie d'une sonde de 250 mm de longueur, une température de 30° C. Dans ces conditions, il a été montré [22], [23], [24] que les réactions chimiques sont vraisemblablement « figées » (composition chimique identique des gaz de combustion à l'entrée et à la sortie de la sonde) au lieu de prélèvement considéré.

2,2.5 Le débit des gaz étant réglé à la valeur voulue, dans l'appareillage d'analyse, on effectue les mesures de concentration par simple manœuvre des robinets trois voies placés sur les deux circuits. Les analyseurs infra-rouge que nous avons utilisés étaient équipés pour doser l'anhydride carbonique et l'oxyde de carbone. Sur le circuit n° 1, on mesure les concentrations CO₂ réel et CO, sur le circuit n° 2 on mesure la quantité CO₂ total et l'on vérifie l'efficacité du four sur l'oxyde de carbone. Évidemment, l'appareillage d'analyse pourrait être utilisé pour doser des imbrûlés autres que CO.

Pour des conditions de fonctionnement données, l'intervalle de temps entre deux mesures (circuits nos 1 et 2) est de l'ordre de dix secondes. Le temps mis par les gaz pour parcourir tout l'appareillage d'analyse depuis le lieu de prélèvement jusqu'aux analyseurs infra-rouge est de l'ordre de une à trois minutes. Les mesures sont donc assez rapides.

2,2.6 La précision de cette méthode d'analyse de gaz est assez difficile à déterminer car elle est liée à de nombreux facteurs. Les différentes erreurs peuvent provenir principalement :

- du four : on ignore si tous les imbrûlés sont transformés intégralement en CO₂;
- de la dessiccation des gaz : malgré l'emploi d'agents chimiques énergiques, il peut subsister une petite quantité de vapeur d'eau;
- de l'analyseur de gaz; la précision de cet appareil dépend :
 - a) de la précision avec laquelle l'étalonnage a été fait à partir de mélanges de concentrations connues, c'est-à-dire de la pureté des gaz et de la méthode de mélange;
 - b) de la stabilité de l'appareil lui-même : elle est subordonnée aux variations de tension et de fréquence du secteur et à la constance des éléments de construction : lampes, condensateur, résistances, etc...
 - c) des variations de pression et de température du gaz à analyser qui jouent un rôle sur l'absorption infra-rouge.

Nous sommes donc dans l'impossibilité de chiffrer chaque erreur. Cependant, un moyen commode nous permettrait d'évaluer la précision globale de cette méthode en tenant compte de la plupart des causes d'erreurs : c'était de comparer les concentrations en CO₂ total mesurées avec les concentrations en CO₂ total calculées à partir des quantités d'air A et de combustible C utilisées dans le foyer (1,2). Dans ce cas, on peut définir un « écart moyen » par la relation :

$$\frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} = \frac{\text{CO}_2 \text{ total calculé} - \text{CO}_2 \text{ total mesuré}}{\text{CO}_2 \text{ total calculé}}.$$

Dans la plupart des essais effectués sur différents foyers nous avons constaté que l'écart $\frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2}$ était de l'ordre de 1 %; mais, accidentellement, cet écart peut s'élever jusqu'à 3 %.

Remarquons que la détermination de cet écart exige une installation de combustion parfaitement au point afin de connaître avec le maximum de précision les débits A et C. A titre d'exemple, on verra dans le tableau (*fig. 7*) la comparaison des concentrations CO_2 total mesurées et calculées pour différentes valeurs du rapport Air/Combustible, à la sortie d'une chambre de combustion de turboréacteur.

RAPPORT $\frac{A}{C}$	$\frac{C}{A} \times 10^{-3}$	CO_2 TOTAL MESURÉ	CO_2 TOTAL CALCULÉ	$\frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} \%$
136,50	7,33	1,520	1,520	0
110,87	9,02	1,845	1,875	+ 1,60
89,03	11,23	2,300	2,340	+ 1,70
81,94	12,20	2,530	2,545	+ 0,58
76,36	13,09	2,745	2,734	— 0,40
70,92	14,10	2,970	2,947	— 0,78
65,95	15,16	3,200	3,173	— 0,85
61,82	16,18	3,395	3,388	— 0,20
54,69	18,28	3,810	3,838	+ 0,73
51,00	19,61	4,110	4,121	+ 0,26
45,98	21,75	4,600	4,582	— 0,39

Fig. 7.

Avec l'appareillage d'analyse des gaz, que nous venons de décrire, la mesure du rendement de combustion (§ 1,8) devient particulièrement facile. On détermine en effet, sur chaque circuit, les concentrations CO_2 réel et CO_2 total qui définissent le rendement η_c .

L'écart $\frac{\Delta \eta_c}{\eta_c}$ commis sur la mesure du rendement est certainement plus petit que l'écart $\frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2}$, car certaines erreurs systématiques s'éliminent dans la détermination du rendement η_c . C'est le rapport de deux quantités mesurées pratiquement au même instant avec le même appareil; aussi, les causes d'erreurs provenant de l'analyseur de gaz n'interviennent pas dans la mesure du rendement. Par suite, on peut penser que :

$$\frac{\Delta \eta_c}{\eta_c} \leq \frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} \simeq 1 \%.$$

De plus, si nous comparons les rendements de combustion η_c et η_t , η_t étant calculé à partir des mesures de températures, on trouve, comme on le verra dans la suite, des écarts de l'ordre de 1 %.

En définitive, la comparaison des concentrations CO_2 total, calculées et mesurées, et des rendements de combustion mesurés par deux méthodes indépendantes, conduit à des écarts de 1 % environ. On peut donc conclure que la méthode d'analyse des gaz mise au point fournit une précision de l'ordre de 1 %.

2,3

MÉTHODE DE MESURE DES TEMPÉRATURES

2,3.1 La méthode la plus classique consiste à utiliser des sondes de température d'arrêt comportant une soudure thermo-électrique que l'on introduit dans l'écoulement.

Ces sondes sont constituées par un tube en acier inoxydable dans lequel des perles de stéatite ou d'alumine permettent le passage d'un thermo-couple. La soudure, à l'extré-

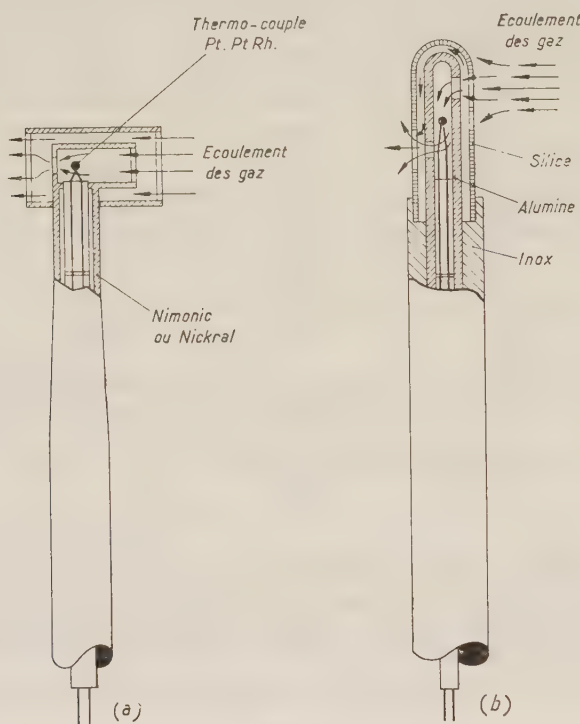


Fig. 8. — Schéma des sondes de température.

mité du tube, est protégée du rayonnement par des écrans destinés à réduire les erreurs de mesure. Le thermo-couple est généralement en chromel-alumel, et de telles sondes conviennent bien pour repérer des températures inférieures à $1\,000^{\circ}\text{C}$. Aussi, elles ne peuvent être utilisées que si la dilution d'air suffisamment importante maintient la température en dessous de cette valeur. Mais, au voisinage du rapport Air/Combustible stoechiométrique, les températures peuvent atteindre des valeurs beaucoup plus élevées (§ 1,6). De ce fait, nous avons été amenés à étudier des sondes thermo-électriques capables de repérer des températures supérieures à $1\,000^{\circ}\text{C}$:

a) les premières sondes construites possédaient un thermo-couple en platine-platine rhodié et les perles d'isolement du thermo-couple étaient en alumine. Le tube support et les écrans de protection contre le rayonnement étaient en Nimonic, alliage résistant aux hautes températures (*fig. 8*). L'emploi de ces sondes, dans la zone de flamme d'une chambre de combustion de turboréacteur, a été un échec. A partir de 1 300° C on a observé la fusion de l'écran intérieur. Le remplacement du Nimonic par du Nickral, alliage un peu plus résistant à la température, n'a pas donné de meilleur résultat;

b) la tenue des métaux étant défectueuse à des températures de cet ordre de grandeur, nous avons construit une sonde avec des matériaux réfractaires. Le support de la sonde est constitué par un tube d'alumine, fermé à une extrémité, entouré d'un tube concentrique en acier inoxydable. A l'intérieur du tube d'alumine, des perles, également en alumine, maintiennent un thermo-couple Pt-PtRh. La circulation des gaz autour de la soudure est assurée par deux trous percés dans le tube et décalés de 15 mm. La section d'entrée des gaz est trois fois plus grande que la section de sortie; ainsi est réalisé le premier écran. Le deuxième écran est constitué par un tube fermé en silice entourant le tube d'alumine. Deux ouvertures, convenablement placées, permettent le passage des gaz (*fig. 8*).

Avec cette sonde nous avons pu repérer des températures voisines de 1 500° C sans que les matériaux employés soient détériorés.

2,3.2 Les erreurs à craindre sur les mesures de température sont [25] :

a) l'écart entre la température autour de la soudure et la température d'arrêt T_a . On sait en effet qu'une soudure nue de forme sensiblement sphérique plongée dans un écoulement de vitesse V , indique, si toutes les fuites thermiques sont nulles ou négligeables, une température T' située entre la température d'arrêt T_a et la température statique T_s de l'écoulement, telle que :

$$(68) \quad \frac{T' - T_s}{T_a - T_s} = \frac{T' - T_s}{\frac{V^2}{2 C_p}} = \lambda,$$

λ est généralement de l'ordre de 0,8;

b) les erreurs par rayonnement et conduction. Elles sont d'autant plus importantes que la température des gaz à mesurer est plus élevée. On réduit ces erreurs en entourant la soudure thermo-électrique d'un ou plusieurs écrans comme nous l'avons vu précédemment.

Il a été montré [26] qu'un double écran, analogue à celui utilisé pour la sonde en Nimonic (*fig. 8*), restreignait au maximum cette catégorie d'erreur;

c) l'erreur due à l'évolution chimique possible des gaz au voisinage ou au contact de la soudure. L'étude de cette erreur est assez difficile, mais on peut craindre qu'un écran porté au rouge dans le voisinage de la soudure soit le siège de réactions chimiques. Ainsi, l'association du platine et de l'hydrogène semble à redouter.

En définitive, les sondes de température d'arrêt généralement utilisées donnent une précision de l'ordre de 2 % tant que la température de l'écoulement reste inférieure

à 800° C. Au-dessus de cette valeur et jusqu'à 1 000° C, l'erreur peut atteindre 5 % si l'on ne prend pas de précautions spéciales. Au delà de 1 000° C les études faites sur la mesure des températures dans les écoulements gazeux à grande vitesse ne nous permettent pas de donner un ordre de grandeur de l'erreur commise. Nous essaierons, dans la suite, de déterminer cette erreur au moyen des renseignements fournis par l'analyse des gaz.

Cependant, la précision sur la mesure des températures des écoulements gazeux peut être améliorée dans certains cas particuliers. Ainsi, nous remarquerons que :

— une sonde de température refroidie par un courant d'eau a été mise au point récemment [27]. Elle a permis de mesurer, avec une erreur de l'ordre de 3 %, des températures voisines de 1 500° C. Cette sonde encombrante ne pouvait être utilisée dans une chambre de turboréacteur sans apporter des perturbations dans l'écoulement, et modifier les conditions de combustion ;

— les erreurs par rayonnement et conduction peuvent être diminuées en utilisant une sonde à « aspiration sonique » [28] (G. LALOS, Nat. Bur. of. St.). La soudure thermo-électrique est placée au col d'une petite tuyère dans laquelle on maintient un débit sonique au moyen d'une pompe d'aspiration. Toutefois, si les erreurs dues au rayonnement et à la conduction sont réduites, il subsiste un écart systématique dû à la vitesse, mais cet écart peut être déterminé par étalonnage.

De telles sondes, réalisées au laboratoire, que nous avons utilisées, conviennent bien tant que la température de l'écoulement reste inférieure à 900° C.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA COMBUSTION DU KÉROSÈNE DANS UNE CHAMBRE DE TURBORÉACTEUR

3,1

INSTALLATION DE COMBUSTION

Une chambre de turboréacteur Lucas-Derwent I est alimentée par de l'air et du kérosène (*fig. 9*). L'air provient d'un compresseur centrifuge et le kérosène est injecté dans la chambre par une pompe à pistons ou à engrenages.

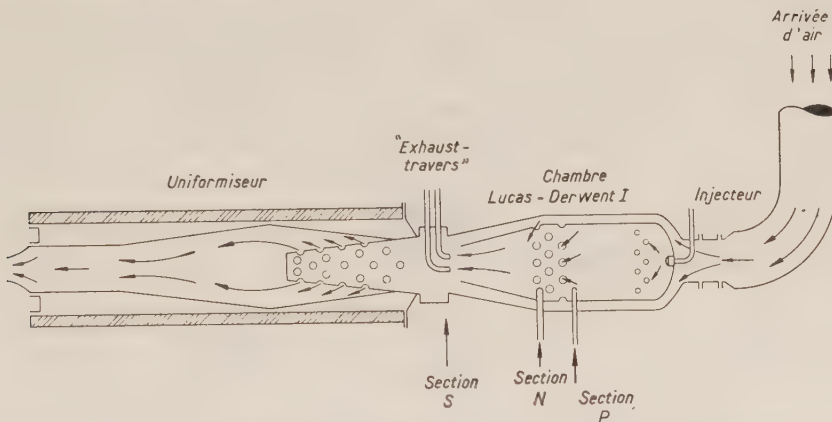


Fig. 9. — Schéma de l'installation de combustion.

A la sortie de la chambre de combustion un appareil, d'origine britannique, permet au moyen de deux sondes, température et prélèvement de gaz, d'effectuer des mesures en tout point de la section de sortie.

Immédiatement derrière cet appareil est placé un « uniformiseur » destiné à mélanger les gaz pour transformer le flux gazeux hétérogène provenant de la chambre de combustion en un écoulement homogène. Cet uniformiseur comporte un système de chicanes constitué par un tronc de cône en Nickral percé de trous. Ce système assure le brassage des gaz, il est muni d'un élément cylindrique qui doit posséder une longueur suffisante (cinq à dix fois le diamètre) pour assurer la régularisation de l'écoulement. L'ensemble est soigneusement calorifugé pour éviter les pertes calorifiques (*fig. 9*).

3,1.1 La chambre de combustion utilisée se compose d'un tube de flamme en Nimonic entouré par une enveloppe possédant des voyants. Ces voyants peuvent être remplacés par une pièce métallique supportant une sonde d'exploration.

Sur la *figure 10* on remarquera :

- les déflecteurs et les trous d'entrée de l'air primaire;
- l'emplacement de l'injecteur;
- les trous d'entrée de l'air secondaire (fraction importante de l'air de combustion);
- au milieu du tube de flamme, les trous d'entrée de l'air de dilution.

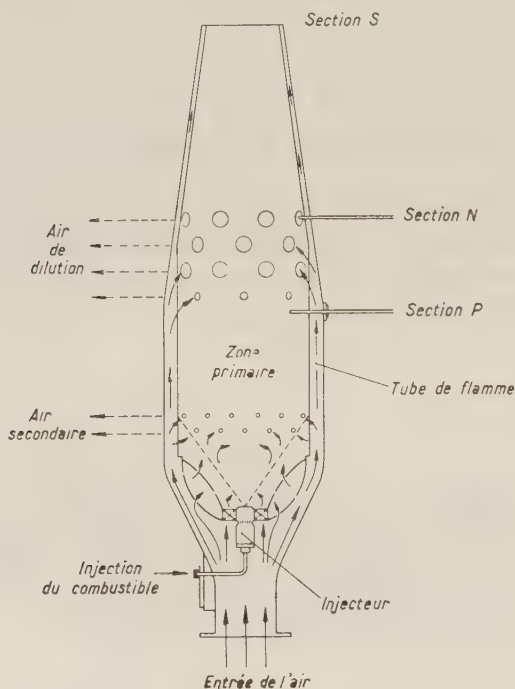


Fig. 10. — Coupe schématique de la chambre Lucas Derwent I.

Cette chambre de combustion en marche normale utilise un débit d'air de 615 g/s et un débit de combustible qui peut varier entre 0 et 15 g/s. Tous nos essais ont été effectués à *débit d'air constant* et débit de combustible variable.

3,1.2 Les quantités d'air et de combustible introduites dans le foyer doivent être déterminées avec le maximum de précision.

La mesure du débit d'air A est réalisée au moyen d'un Venturi installé sur la tuyauterie d'entrée de l'air à l'aspiration du compresseur. La dépression au col du Venturi est mesurée par un manomètre à eau. En tenant compte de la pression atmosphérique et de la température de l'air, on obtient une précision de 1 % environ sur les débits mesurés.

Pour mesurer le débit de combustible on emploie la méthode dite « de la balance ». La pompe à combustible est alimentée, en marche normale, par du kérosène placé dans un réservoir en charge. Un robinet trois voies permet d'alimenter la pompe avec du kérosène contenu dans un récipient placé sur le plateau d'une balance. On pompe, dans ce récipient, un poids P connu de combustible, et la balance en passant à l'équilibre déclenche automatiquement un chronoscope qui mesure le temps mis pour consommer ce poids P de combustible.

Une telle mesure fournit une précision de 0,5 % environ sur le débit de combustible.

3,1.3 Avant d'étudier la combustion du kérosène sur cette installation (*fig. 9*) il était nécessaire de définir des « sections conventionnelles de mesure », choisies de manière que la comparaison des quantités mesurées dans ces différentes sections permette d'apprécier l'évolution de la combustion. En tenant compte de la conception de la chambre Lucas-Derwent I nous avons défini les sections suivantes :

a) la section O à l'entrée de la chambre de combustion. Dans cette section on repère la température de l'air provenant du compresseur;

b) la section P, à l'intérieur du tube de flamme, est située dans la zone primaire de la chambre avant mélange des gaz chauds avec l'air de dilution (*fig. 10*). En ce lieu, le flux gazeux est hétérogène, aussi on doit effectuer des explorations. Mais, l'exploration de toute la section étant mécaniquement très difficile, nous nous limiterons à des mesures en sept points répartis sur un diamètre de cette section. Pour cela, une pièce métallique convenable est fixée sur l'enveloppe de la chambre à la place d'un voyant. Une sonde de température ou de prélèvement de gaz peut coulisser dans cette pièce ou être immobilisée par un dispositif de serrage.

Nous définirons les valeurs moyennes des quantités mesurées dans cette section par la moyenne arithmétique des quantités mesurées localement. Ainsi, par exemple, on aura :

$$(69) \quad \overline{(\text{CO})}_P \% = \frac{\sum_1^7 (\text{CO}) \%}{7} \quad \text{ou} \quad \overline{(\text{CO}_2 \text{ réel})}_P \% = \frac{\sum_1^7 (\text{CO}_2 \text{ réel}) \%}{7};$$

c) la section N est située également à l'intérieur du tube de flamme dans une zone de mélange des gaz chauds et de l'air de dilution. Le flux gazeux étant hétérogène, on a choisi six points de mesure sur un diamètre de la section et les valeurs moyennes des quantités mesurées sont définies par les relations :

$$(70) \quad \overline{(\text{CO}_2 \text{ réel})}_N \% = \frac{\sum_1^6 (\text{CO}_2 \text{ réel}) \%}{6}, \quad \overline{(\text{CO})}_N \% = \frac{\sum_1^6 (\text{CO}) \%}{6};$$

d) à la sortie de la chambre, section S, on peut effectuer des mesures en tous points de la section (*fig. 9*). Afin de limiter les mesures, seize points ont été répartis sur des cercles concentriques. La position des points sur ces cercles a été déterminée de manière que chacun d'eux représente le « point milieu » de surfaces élémentaires ΔS telles que $\Delta S = \frac{S}{16}$ (S étant la surface de la section de sortie).

De même que dans les sections précédentes, les valeurs moyennes des quantités mesurées sont données par des équations de la forme :

$$(71) \quad \overline{(t_3)}_s = \frac{\Sigma_1^{16} (t_3)}{16}, \quad \overline{(\text{CO})}_s \% = \frac{\Sigma_1^{16} (\text{CO}) \%}{16};$$

e) la section U à la sortie de l'uniformiseur représente la dernière section de mesure. *En ce lieu nous avons vérifié que le flux gazeux était homogène en pressions, vitesses, concentrations et températures. Par suite, pour un rapport Air/Combustible donné, une seule mesure suffit en un point quelconque de la section.*

3,1.4 La chambre de combustion Lucas-Derwent I peut fonctionner pour des rapports Air/Combustible compris entre 42 et 150. Malgré la rapidité des méthodes de mesure les explorations dans les sections P, N ou S sont relativement longues et chaque exploration doit être faite en conservant constant le rapport A/C. Enfin, ces explorations doivent être répétées dans les différentes sections de l'installation de combustion pour diverses valeurs du rapport A/C. Pour réduire le nombre des essais nous avons choisi arbitrairement sept régimes de fonctionnement de la chambre qui correspondent à des rapports Air/Combustible de 142, 112, 93, 77, 61, 50 et 45.

3,2

MESURE DES TEMPÉRATURES ET DES CONCENTRATIONS EN CO ET CO₂

3,2.1 En utilisant les méthodes de mesure décrites dans le chapitre précédent on détermine les concentrations CO, CO₂ réel, CO₂ total et les températures dans les différentes sections de l'installation de combustion.

SECTION U.

Les concentrations (CO₂ réel)_U et (CO₂ total)_U mesurées à la sortie de l'uniformiseur (*fig. 11*) augmentent constamment en fonction du rapport C/A. On constate que la concentration en CO₂ total varie linéairement avec le C/A, la relation théorique (16) établie précédemment est donc vérifiée.

Les températures (t₃)_U sont comprises entre 300 et 900° C. Si l'on construit la courbe (t₃)_U en fonction des concentrations (CO₂ réel)_U on observe une variation linéaire (*fig. 15*). Ce résultat est en accord avec l'équation théorique (67).

Les quantités d'oxyde de carbone mesurées diminuent quand le rapport C/A augmente (*fig. 11*) et la courbe obtenue présente un palier qui correspond sensiblement à $\frac{C}{A} = 14,5 \times 10^{-3}$.

La mesure des concentrations (CO₂ réel)_U et (CO₂ total)_U des températures (t₃)_U et t₀ permet de déterminer les rendements de combustion η_o et η_t . Quel que soit le rapport A/C, la chambre de combustion utilisée possède un bon rendement qui reste compris entre 0,90 et 0,98 (*fig. 12*). On observe un décalage de l'ordre de 1 % entre les deux

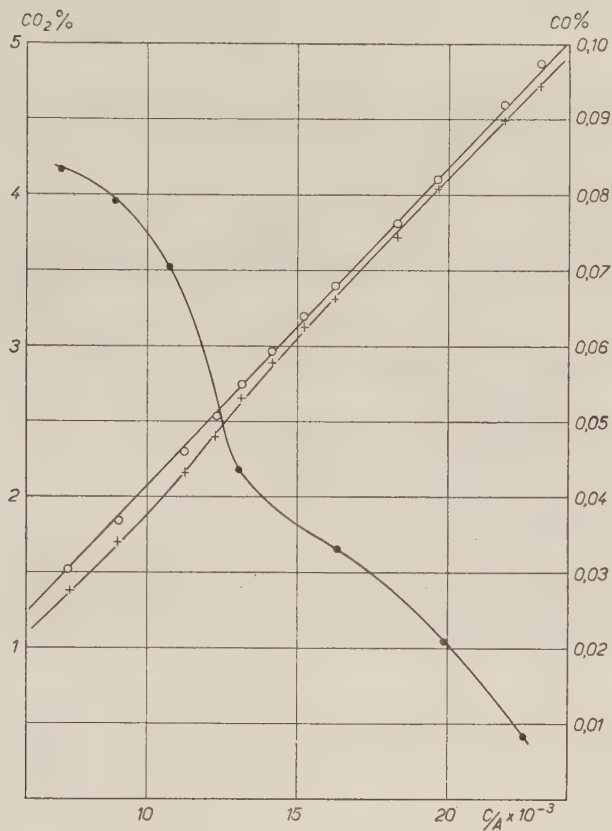


Fig 11. — Concentrations en CO_2 réel + CO_2 total ○ et CO ● mesurées à la sortie de l'uniformiseur.

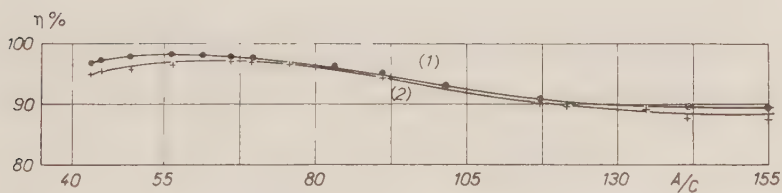


Fig. 12. — Rendement de combustion de la chambre Lucas-Derwent 1.

- (1) $\eta_c = \frac{CO_2 \text{ réel}}{CO_2 \text{ total}}$
 (2) η_t bilan thermique.

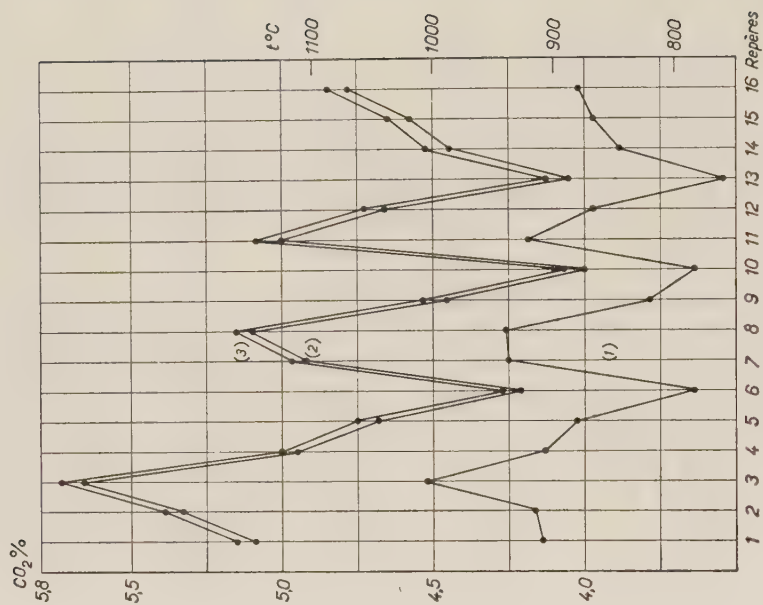


Fig. 14. — Exploration à la sortie de la chambre A/C = 45.
(1) Températures, — (2) CO₂% réel, — (3) CO₂% total.

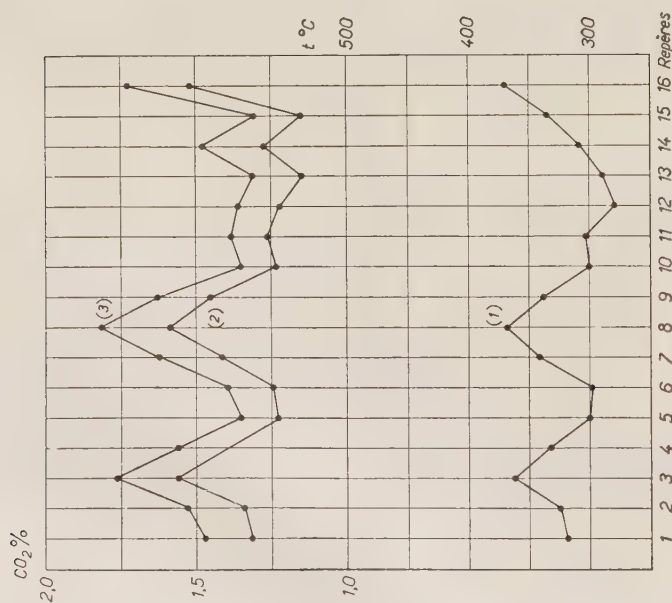


Fig. 13. — Exploration à la sortie de la chambre A/C = 142.
(1) Températures, — (2) CO₂% réel, — (3) CO₂% total.

courbes (§ 2,2.6) qui peut provenir autant des définitions approchées des deux rendements que d'erreurs inhérentes aux mesures.

SECTION S.

Des diagrammes représentatifs des explorations faites à la sortie de la chambre ont été construits pour chacun des rapports A /C choisis en portant en abscisses les seize points repères, et en ordonnées concentrations en CO_2 et températures mesurées.

Ces diagrammes (*fig. 13 et 14*) montrent que :

— les concentrations $(\text{CO}_2)_s$ varient dans le même sens que les températures $(t_3)_s$ quel que soit le rapport A /C considéré;

— à partir des concentrations $(\text{CO}_2 \text{ réel})_s$ et des températures $(t_3)_s$, mesurées aux divers points de la section de sortie pour différentes valeurs du rapport A /C, on peut construire la courbe $(t_3)_s = \varphi (\text{CO}_2 \text{ réel})_s$ et comparer avec les mêmes quantités mesurées à la sortie de l'uniformiseur (*fig. 15*). On constate que les points expérimentaux obtenus à la sortie de la chambre se groupent au voisinage de la droite $(t_3)_U = \varphi' (\text{CO}_2 \text{ réel})_U$, donc, la répartition des concentrations en CO_2 réel dans l'écoulement hétérogène donne la répartition des températures. L'origine des écarts qui apparaissent peut s'expliquer ainsi :

— le flux hétérogène à la sortie de la chambre résulte du mélange turbulent des gaz chauds et de l'air de dilution. Pour un rapport A /C constant le flux hétérogène peut subir des variations dues :

- au défaut de stabilité chimique, car les réactions ne sont pas toujours terminées en un point considéré;
- à la non-permanence de l'écoulement;
- à la non-simultanéité des mesures : en effet, avec l'appareil d'exploration, les deux sondes, température et prélèvement de gaz, opèrent séparément, et la température est repérée lorsque le prélèvement de gaz a été effectué.

Ces résultats (*fig. 15*) confirment bien l'incertitude des mesures dans une zone d'hétérogénéité. Il est à remarquer que nous avons déjà observé [20] de tels écarts au cours de mesures en flux hétérogène sur une chambre de combustion différente : la Jumo 0-04.

Les concentrations en oxyde de carbone mesurées $(\text{CO})_s$ varient pour chaque essai dans le même sens que la différence :

$$(\delta \text{CO}_2)_s = (\text{CO}_2 \text{ total})_s - (\text{CO}_2 \text{ réel})_s.$$

De ce fait, on peut penser que l'oxyde de carbone représente l'imbrûlé principal formé au cours de la combustion du kérosène dans l'air.

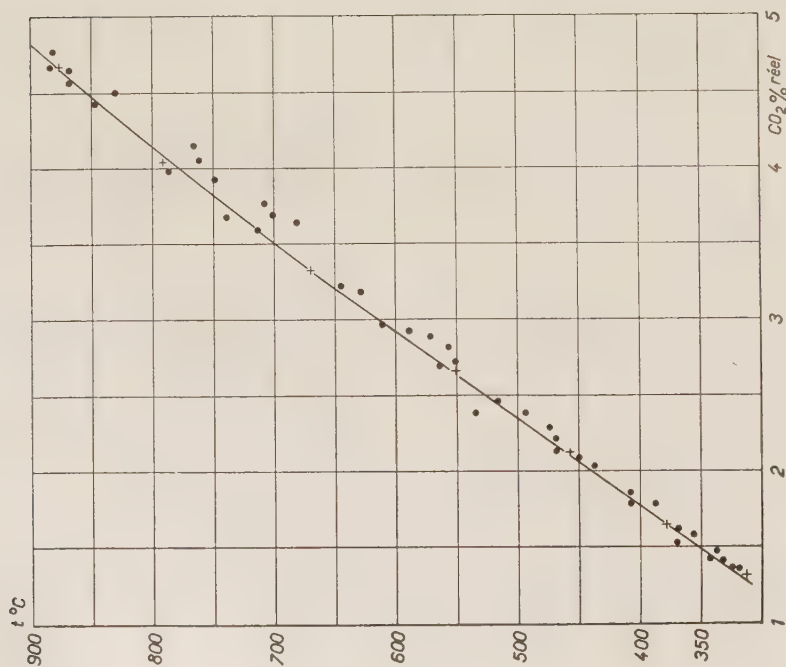


Fig. 15. — Températures et concentrations en CO₂ réel mesurées à la sortie de l'uniformiseur + à la sortie de la chambre ●

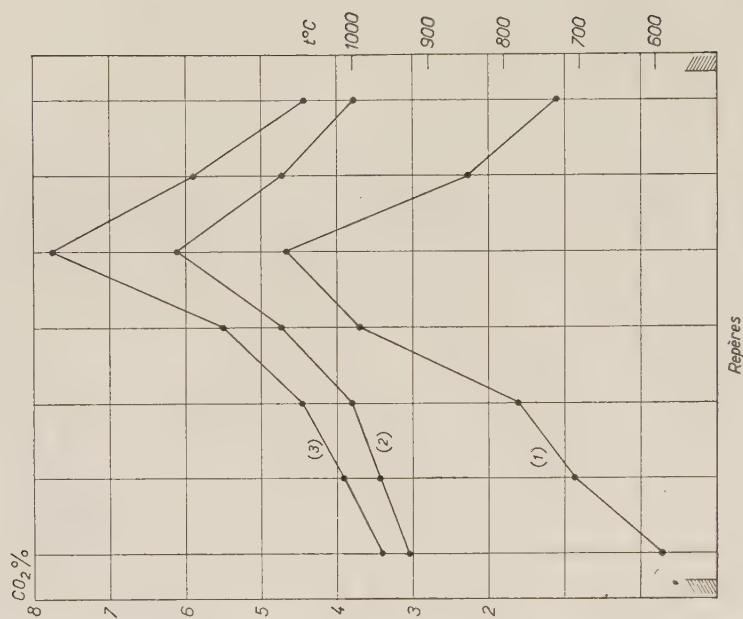


Fig. 16. — Exploration dans la zone primaire P A/C = 142.
(1) Températures, — (2) CO₂ % réel, — (3) CO₂ % total.

SECTION P.

Avant mélange des gaz chauds avec l'air de dilution, immédiatement en aval de la flamme, des explorations ont été faites sur un diamètre de cette section. Des diagrammes représentatifs de ces explorations, analogues à ceux de la section S, ont été établis (*fig.* 16, 17, 18).

Les concentrations $(\text{CO}_2 \text{ réel})_P$ assez élevées et comprises localement entre 3 et 12 % varient dans le même sens que les températures $(t_3)_P$. Les températures évoluent localement entre 600 et 1 500° C, elles ont été repérées avec la sonde en matériaux réfractaires décrite précédemment (§ 2,3.1).

A partir des valeurs moyennes $(\overline{\text{CO}_2 \text{ réel}})_P$ et $(\overline{t_3})_P$ on peut vérifier la relation théorique (67) qui indique une variation linéaire. Nous n'obtenons pas une droite (*fig.* 19) mais une courbe de faible courbure; de plus, certains points expérimentaux s'écartent de la courbe tracée. Ces écarts peuvent provenir, non seulement du défaut de stabilité chimique, de la non-permanence de l'écoulement ou de la non-simultanéité des mesures, mais aussi de la définition adoptée pour les valeurs moyennes. La détermination rigoureuse des valeurs moyennes exigerait une exploration totale du flux dans la section P, ce qui est mécaniquement très difficile. De plus, la courbure observée est liée aux erreurs de mesure et si la précision sur les concentrations mesurées est connue, on ignore l'erreur introduite par la sonde de température utilisée; cette erreur doit être d'autant plus forte que la température à repérer est plus élevée. Nous reviendrons sur ce point dans la suite.

Les concentrations d'oxyde de carbone comprises localement entre 0,8 et 5,0 % varient comme la quantité $(\delta \text{CO}_2)_P = (\text{CO}_2 \text{ total})_P - (\text{CO}_2 \text{ réel})_P$ (*fig.* 20, 21, 22). Ce résultat, valable localement quel que soit le rapport A/C, apparaît également si l'on considère les valeurs moyennes $(\text{CO})_P$ et $(\overline{\delta \text{CO}_2})_P = (\overline{\text{CO}_2 \text{ total}})_P - (\overline{\text{CO}_2 \text{ réel}})_P$ (*fig.* 23).

SECTION N.

Des explorations ont été faites, après mélange des gaz chauds avec l'air de dilution en six points d'un diamètre de la section :

— les concentrations en CO_2 moins élevées que dans la section P et comprises localement entre 1 et 11 % évoluent comme les températures (*fig.* 24, 25) qui s'échelonnent entre 360 et 1 400° C;

— les quantités $(\text{CO})_N$, notablement plus faibles que dans la section P (de 0,1 à 1 %) varient dans le même sens que la différence $(\delta \text{CO}_2)_N = (\text{CO}_2 \text{ total})_N - (\text{CO}_2 \text{ réel})_N$ (*fig.* 26-27). On obtient une variation analogue si l'on considère les valeurs moyennes $(\overline{\delta \text{CO}_2})_N$ et $(\text{CO})_N$. On trouve donc dans cette section des résultats semblables à ceux obtenus dans la section P.

3,2.2 L'évolution de la combustion du kérosène peut être étudiée à partir des valeurs moyennes des quantités mesurées dans les différentes sections :

a) l'uniformiseur transforme le flux hétérogène provenant de la chambre en un flux homogène et les explorations à la sortie de la chambre sont remplacées par une mesure

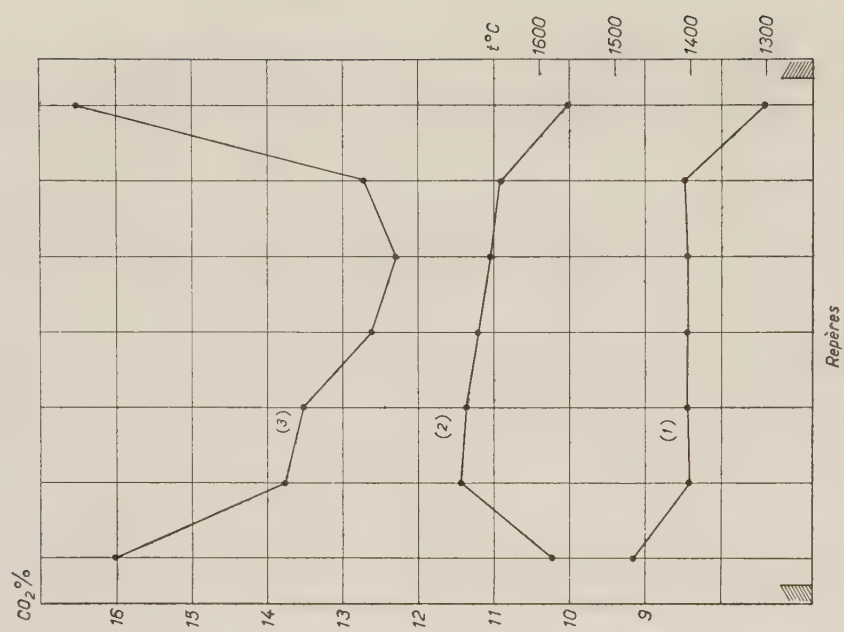


Fig. 18. — Exploration dans la zone primaire P A/C = 45.
(1) Températures, — (2) CO₂ % réel, — (3) CO₂ % total.

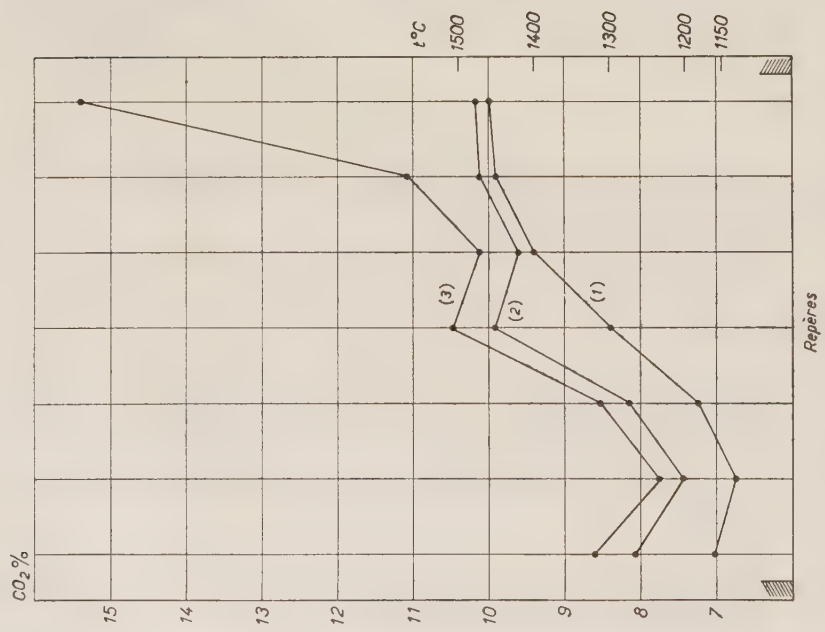


Fig. 17. — Exploration dans la zone primaire P A/C = 61.
(1) Températures, — (2) CO₂ % réel, — (3) CO₂ % total.

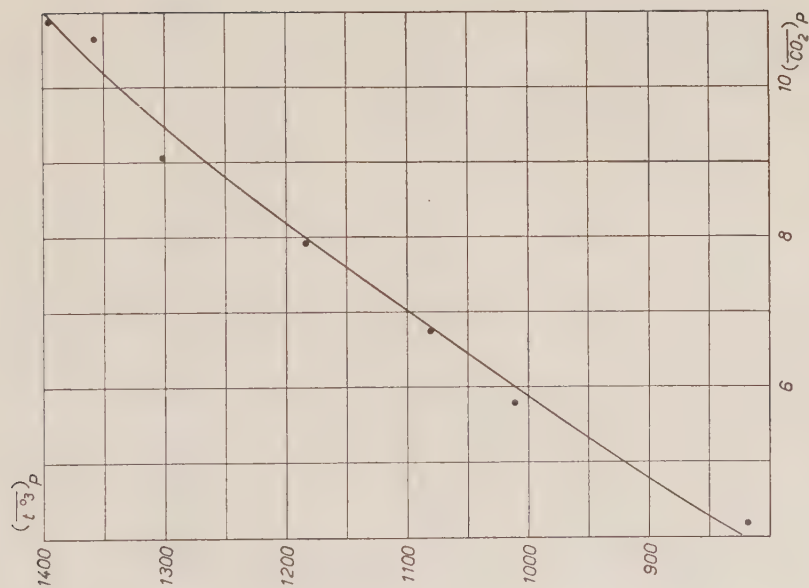


Fig. 19. — Concentrations ($\overline{CO_2}$ réel)_P et températures moyennes dans la zone primaire P.

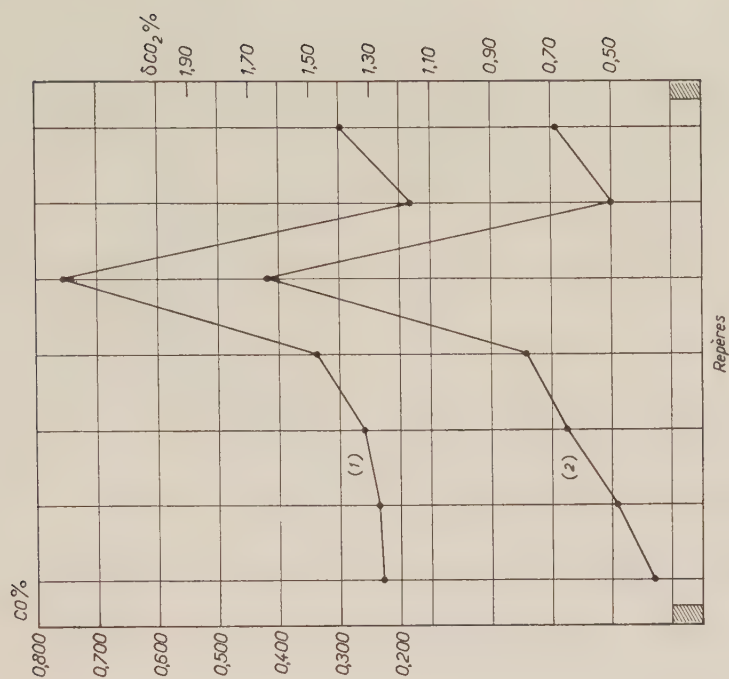


Fig. 20. — Exploration zone primaire P (1) $CO_2\%$ — $A/C = 142$.
(2) $\delta CO_2 = CO_2$ total — CO_2 réel.

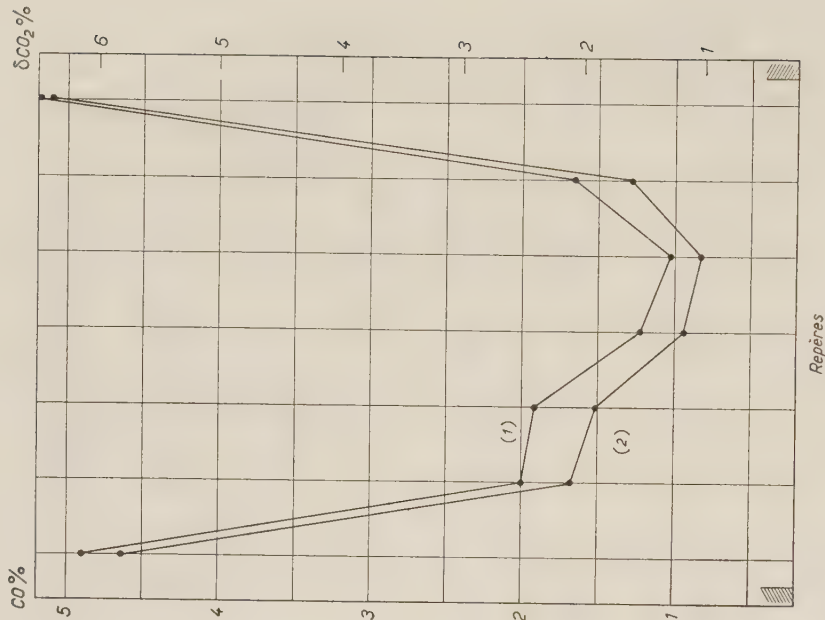


Fig. 22. — Exploration zone primaire P — A/C = 45
(1) CO %, — (2) δCO₂ = CO₂ total — CO₂ réel.

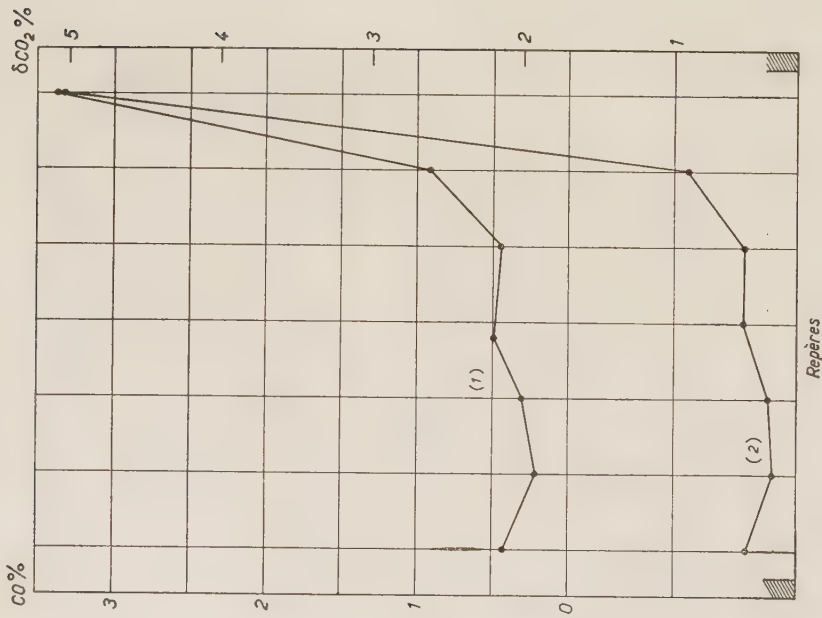


Fig. 21. — Exploration zone primaire P — A/C = 61.
(1) CO %, — (2) δCO₂ = CO₂ total — CO₂ réel.

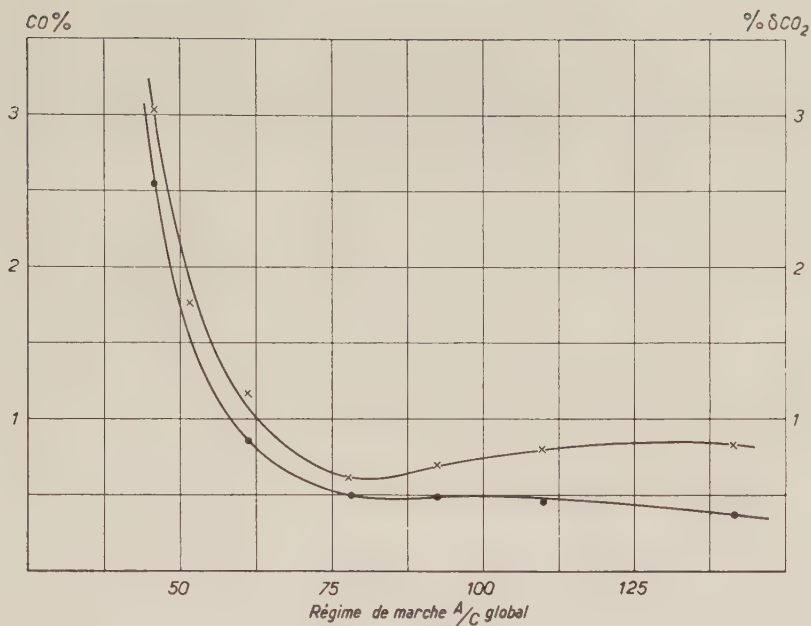


Fig. 23. — Chambre Lucas Derwent I. Zone primaire P $\times (\delta CO_2)_F = (CO_2 \text{ total})_F - (CO_2 \text{ réel})_F$ • $(CO)\%_P$.

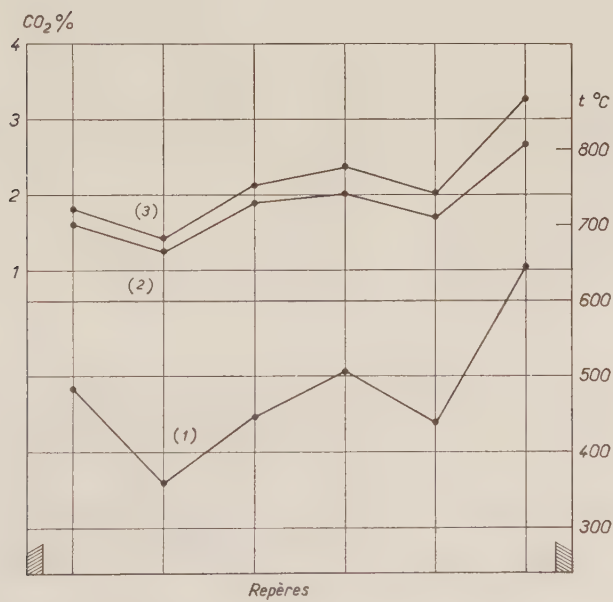


Fig. 24. — Exploration zone de dilution — Section N — A/C = 142
(1) Températures. — (2) CO2% réel. — (3) CO2% total.

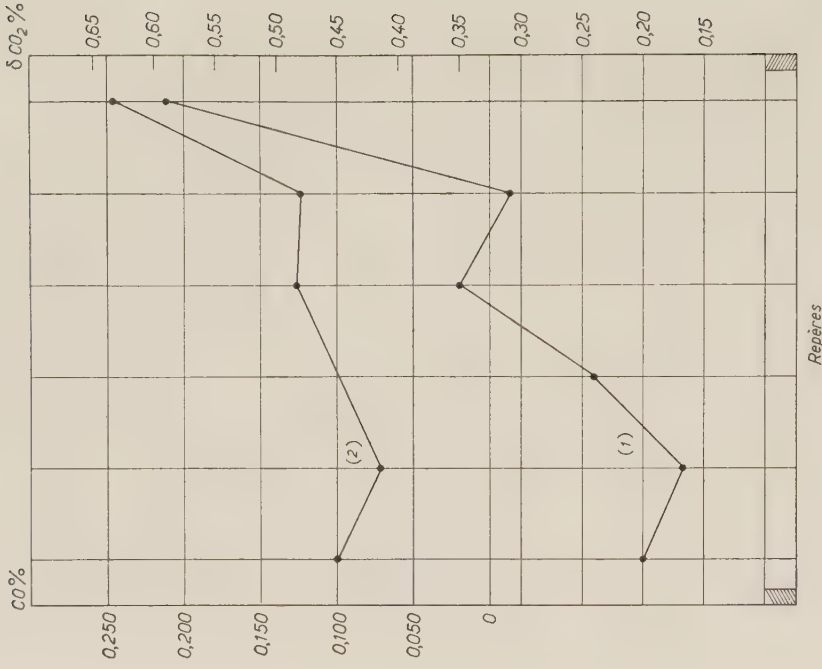


Fig. 26. — Exploration zone de dilution Section N. A/C = 142.
(1) $\delta\text{CO}_2 = \text{CO}_2 \text{ total}$. — (2) $\text{CO}_2 \text{ réel}$.

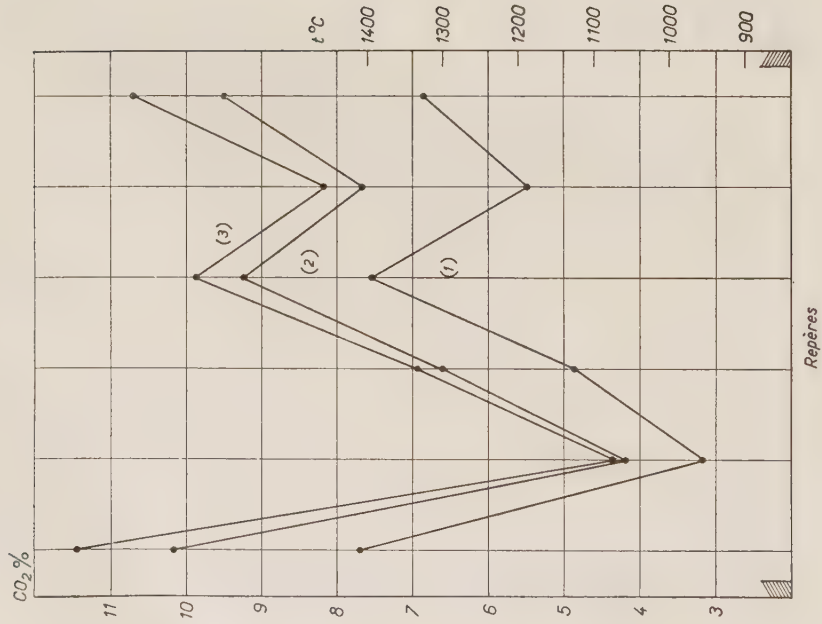


Fig. 25. — Exploration zone de dilution Section N. A/C = 45.
(1) Températures. — (2) $\text{CO}_2\% \text{ réel}$. — (3) $\text{CO}_2\% \text{ total}$.

unique dans la section U. Mais il est permis de se demander si les gaz de combustion n'évoluent pas en traversant l'uniformiseur. Cette évolution chimique possible peut être détectée en comparant les quantités mesurées dans les sections S et U. On constate (*fig. 28*) que l'erreur moyenne, en général de 1 à 2 %, est de l'ordre de grandeur des erreurs de mesures, quelle que soit la quantité considérée. Ces écarts sont très faibles, car

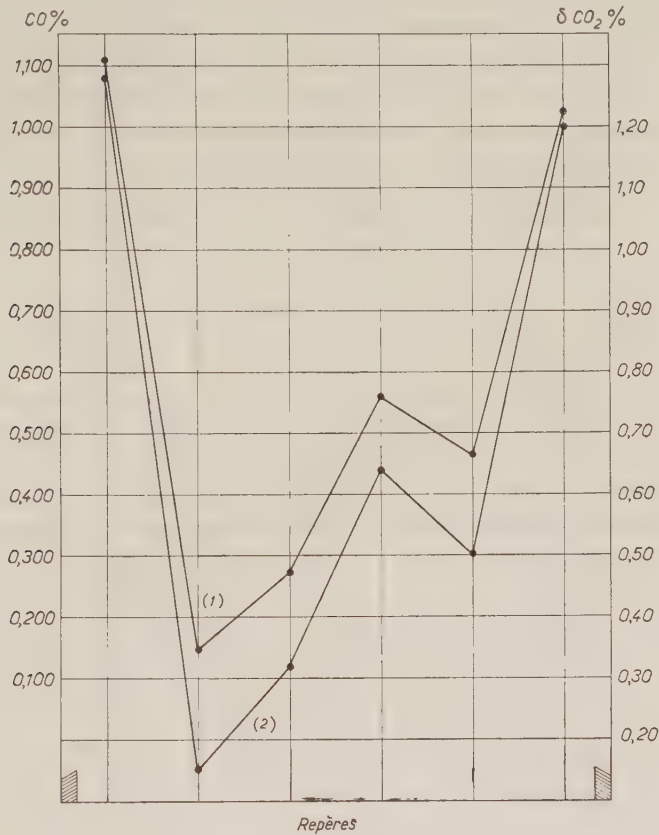


Fig. 27. — Exploration zone de dilution Section N A/C = 45.
(1) $CO\%$. — (2) $\delta CO_2 = CO_2 \text{ total} - CO_2 \text{ réel}$.

aux erreurs de mesures s'ajoute l'erreur sur l'établissement des valeurs moyennes. Celle-ci apparaît surtout si l'on remarque que (*fig. 28*) :

- l'erreur est toujours orientée dans le même sens (les valeurs moyennes des quantités mesurées dans la section S sont supérieures aux quantités mesurées dans la section U);
- pour un rapport A/C donné, l'erreur sur le CO_2 réel et le CO_2 total a sensiblement la même valeur.

En conséquence, l'évolution chimique dans l'uniformiseur doit être très faible puisque les mesures de températures et de concentrations en CO_2 sont insuffisamment sensibles pour la détecter.

A C	QUANTITÉS MESURÉES	SECTION S	SECTION U	ERREUR %
142	CO ₂ réel	1,334	1,295	+ 2,9
	CO ₂ total	1,503	1,440	+ 4,1
	T°c	322	310	+ 3,7
	η _c	0,887	0,899	+ 1,3
112	CO ₂ réel	1,688	1,675	+ 0,7
	CO ₂ total	1,834	1,820	+ 0,7
	T°c	390	380	+ 2,5
	η _c	0,920	0,920	0
93	CO ₂ réel	2,170	2,115	+ 2,5
	CO ₂ total	2,290	2,250	+ 1,7
	T°c	469	460	+ 1,9
	η _c	0,947	0,945	+ 0,2
77	CO ₂ réel	2,695	2,660	+ 1,2
	CO ₂ total	2,763	2,730	+ 1,2
	T°c	558	550	+ 1,4
	η _c	0,975	0,974	+ 0,1
61	CO ₂ réel	3,510	3,420	+ 2,5
	CO ₂ total	3,567	3,475	+ 2,5
	T°c	675	670	+ 0,7
	η _c	0,984	0,984	0
50	CO ₂ réel	4,089	4,050	+ 0,9
	CO ₂ total	4,143	4,105	+ 0,9
	T°c	789	789	0
	η _c	0,987	0,987	0
45	CO ₂ réel	4,763	4,744	+ 0,4
	CO ₂ total	4,811	4,785	+ 0,5
	T°c	876	872	+ 0,4
	η _c	0,984	0,986	— 0,2

Fig. 28.

Par contre, en comparant les quantités $(CO)_v$ et $(CO)_s$ on obtient (*fig. 29*) une séparation nette des courbes. A partir de $C/A = 14,5 \times 10^{-3}$ les concentrations $(\overline{CO})_s$ augmentent tandis que les quantités $(CO)_v$ diminuent. Le point de divergence des courbes correspond à la température de $600^\circ C$ qui est précisément la température d'inflammation de l'oxyde de carbone. Il est donc probable que le CO présent dans les gaz de combustion brûle dans l'uniformiseur pour des rapports $C/A > 14,5 \times 10^{-3}$. Les faibles teneurs en CO des gaz de combustion nous ont permis d'utiliser l'analyseur de gaz avec une sensibilité suffisante pour caractériser l'évolution chimique. Du fait que le rendement de combustion $(\overline{\eta_c})_s$ à la sortie de la chambre est bon, les mesures de rendement à la sortie de l'uniformiseur sont peu influencées par la combustion partielle de l'oxyde de carbone dans cet appareil. On peut le vérifier en calculant la limite supérieure de l'erreur $\frac{\Delta \eta_c}{\eta_c}$ à partir de l'écart maximum des concentrations en CO.

On trouve $\frac{\Delta \eta_c}{\eta_c} \leq 1 \%$. Cette erreur est bien de l'ordre de grandeur des erreurs de mesure;

b) la configuration de l'écoulement se modifie constamment avec le rapport Air/Combustible. Dans la section P pour des rapports $C/A > 16 \times 10^{-3}$ la différence $(\delta CO_2)_p$ atteint, aux extrémités du diamètre exploré, des valeurs notables qui correspondent évidemment aux concentrations maxima $(CO)_p$ (*fig. 21, 22*). On peut penser que pour les rapports C/A élevés la quantité de combustible injectée augmentant, il se produit un mauvais mélange du combustible avec l'air primaire : une partie du combustible brûle en mélange riche (points extrêmes du diamètre), l'autre en mélange pauvre. D'ailleurs le schéma de la chambre (*fig. 10*) montre que la densité du combustible a la plus grande chance d'être maximum aux points extrêmes du diamètre. *Ainsi, ces analyses de gaz permettent d'étudier l'injection et la répartition du combustible.*

L'écoulement dans la section N se modifie avec les rapports A/C . Aux extrémités du diamètre exploré on retrouve, comme dans la section P, des différences $(\delta CO_2)_N$ qui correspondent aux concentrations $(CO)_N$ maximum. Afin de caractériser graphiquement l'évolution de la configuration du jet gazeux, nous avons représenté (*fig. 30*) les explorations en température faites sur un diamètre de cette section pour différents rapports A/C .

A la sortie de la chambre les mêmes remarques peuvent être faites, mais le mélange des gaz chauds et de l'air de dilution est plus intimement réalisé;

c) la dilution D représente un facteur important dans l'évolution de la combustion. C'est le rapport de la quantité d'air totale introduite dans la chambre à la quantité d'air participant directement à la combustion (air primaire + air secondaire). Cette dilution D peut être déterminée par le rapport :

$$(72) \quad D = \overline{(CO_2 \text{ total})}_r / \overline{(CO_2 \text{ total})}_s,$$

car le changement dans la valeur des concentrations moyennes en CO_2 total entre les sections P et S ne peut être dû qu'à l'intervention de l'air de dilution. En fonction du rapport A/C , le facteur de dilution D varie peu et reste compris entre 2,9 et 3,5. Les plus

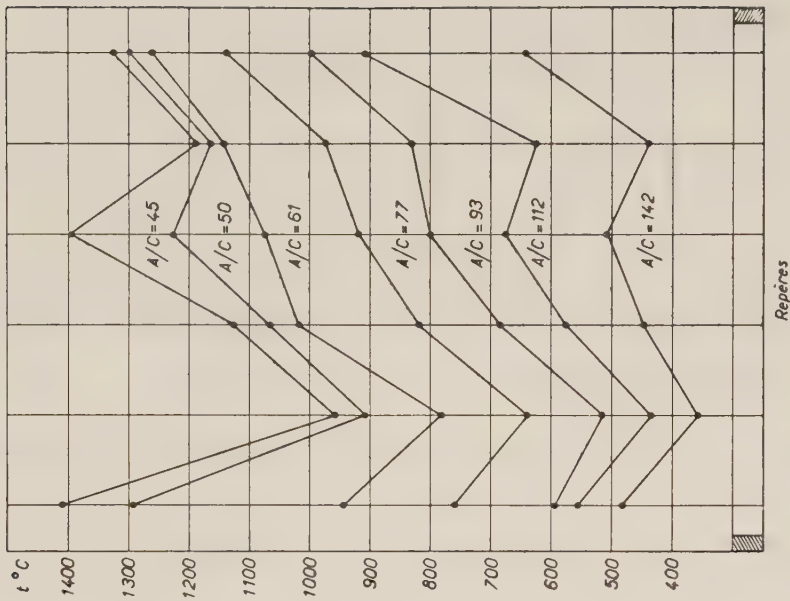


Fig. 30. — Explorations en températures.
Zone de dilution, Section N.

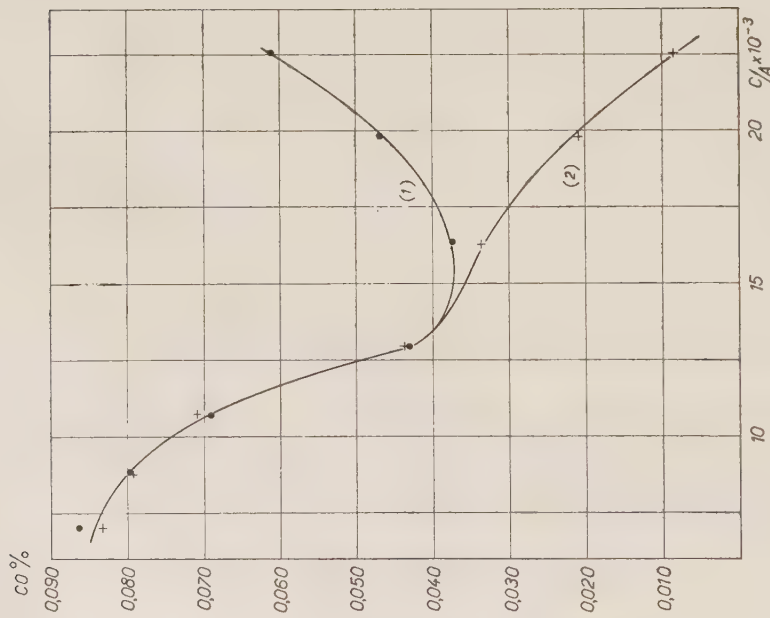


Fig. 29. — (1) $\text{CO } \%$ à la sortie de la chambre.
+ (2) $\text{CO } \%$ à la sortie de l'uniformiseur.

grandes dilutions apparaissent aux rapports C/A faibles, car la quantité d'air secondaire utilisée par la combustion dans la section P est plus petite.

Remarquons que le facteur D peut être déterminé approximativement par le calcul : on mesure, dans la chambre, les sections de passage de l'air primaire, secondaire et de dilution et, connaissant le débit d'air total, on en déduit la dilution. En effectuant ce calcul on trouve $D \simeq 3$. Cette valeur est évidemment très imprécise et ne tient pas compte de la quantité de combustible injectée;

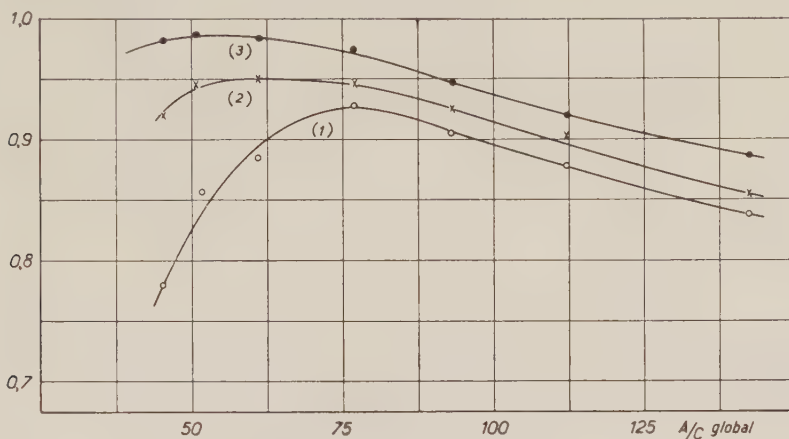


Fig. 31. — Chambre Lucas Derwent I.
Rendement de combustion moyen mesuré dans les différentes zones.

(1) $\square (\eta_c)_P$ — (2) $\times (\eta_c)_N$ — (3) $\bullet (\eta_c)_S$

d) la connaissance de la dilution permet de déterminer les rapports Air/Combustible moyens dans la section P. Nous pouvons écrire :

$$(73) \quad \left(\frac{A}{C} \right)_{\text{global}} = \left(\frac{A}{C} \right)_P \times D,$$

et les calculs effectués montrent que les rapports $(\overline{A/C})_P$ évoluent entre 40 et 15,8; donc, lorsque la quantité de combustible injectée est maximum, il existe dans la section P un mélange Air/Combustible moyen très voisin du mélange stoechiométrique;

e) le combustible brûle dans la chambre en utilisant l'air primaire et l'air secondaire comme comburant, puis, après mélange avec l'air de dilution, les gaz parviennent à la sortie de la chambre. Il importe de rechercher si l'air de dilution a uniquement pour rôle de refroidir les gaz brûlés provenant de la section P ou s'il participe effectivement à la combustion.

En comparant les rendements η_c dans les différentes sections étudiées on constate (fig. 31) que la combustion s'améliore depuis la section P jusqu'à la sortie de la chambre et nous pouvons écrire, pour tous rapports A/C , que :

$$(74) \quad (\eta_c)_P < (\eta_c)_N < (\eta_c)_S.$$

Cette évolution de la combustion peut encore être caractérisée en comparant les

concentrations d'oxyde de carbone et d'anhydride carbonique mesurées dans les sections P et S :

Si l'air de dilution ne jouait aucun rôle dans la combustion nous pourrions écrire :

$$(75) \quad \frac{(\overline{\text{CO}_2 \text{ réel}})_P}{D} = (\overline{\text{CO}_2 \text{ réel}})_S,$$

et :

$$(76) \quad \frac{(\overline{\text{CO}})_P}{D} = (\overline{\text{CO}})_S.$$

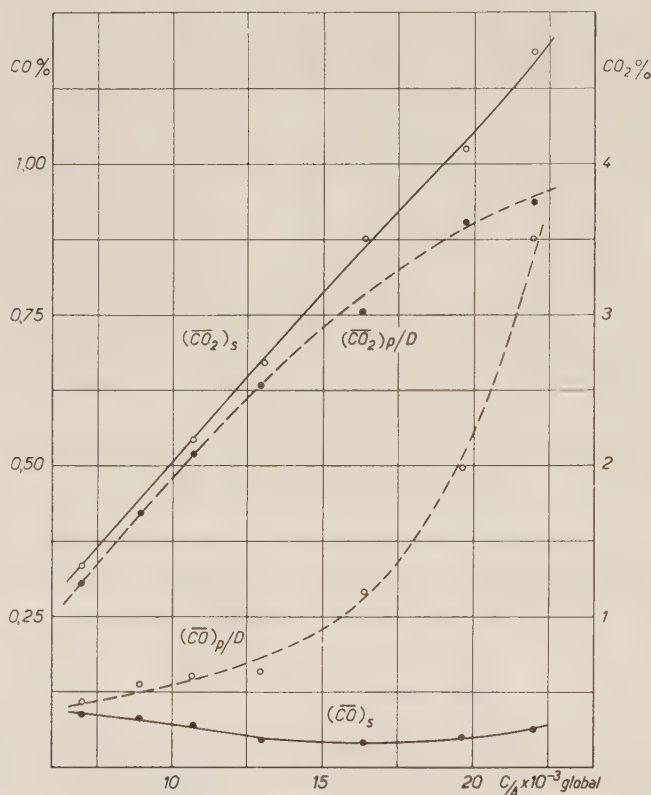


Fig. 32.

Par contre, si l'air de dilution améliore la combustion les quantités de CO et de CO_2 doivent varier conformément aux inégalités suivantes :

$$(77) \quad \frac{(\overline{\text{CO}_2 \text{ réel}})_P}{D} < (\overline{\text{CO}_2 \text{ réel}})_S,$$

$$(78) \quad \frac{(\overline{\text{CO}})_P}{D} > (\overline{\text{CO}})_S.$$

Les courbes obtenues (fig. 32) vérifient bien ces deux inégalités;

f) Nous avons observé que la quantité d'oxyde de carbone formé variait dans les différentes sections P, N, S, et notamment dans la section P (fig. 23) comme la différence

$(\delta\overline{\text{CO}_2}) = (\overline{\text{CO}_2 \text{ total}}) - (\overline{\text{CO}_2 \text{ réel}})$. Ces résultats nous permettent de montrer que l'oxyde de carbone représente l'imbrûlé majeur formé au cours de la combustion du kérosène dans l'air. En effet le rendement de combustion peut s'écrire :

$$\eta_c = \frac{\text{CO}_2 \text{ réel}}{\text{CO}_2 \text{ total}} = 1 - \frac{\delta\text{CO}_2}{\text{CO}_2 \text{ total}} = 1 - \pi.$$

La quantité $\frac{\delta\text{CO}_2}{\text{CO}_2 \text{ total}}$ représente donc la perte totale telle que nous l'avons définie au § 1,7.2. Elle est égale à la somme des pertes dues à chaque imbrûlé :

$$(79) \quad \pi = \frac{\delta\text{CO}_2}{\text{CO}_2 \text{ total}} = \frac{(\text{CO} + \text{C}_n' \text{H}_m' + \text{CH}_4 + \text{H}_i \text{CH}_i \text{O} + \dots)}{\text{CO}_2 \text{ total}}$$

et la fraction de perte μ_{CO} due à l'oxyde de carbone est égale à :

$$\mu_{\text{CO}} = \frac{(\text{CO})}{\delta\text{CO}_2}.$$

Si l'on détermine ce rapport, on constate que, dans la section P, 80 % de la perte totale provient de l'oxyde de carbone lorsque le rapport A/C global est compris entre 75 et 45. Pour des rapports A/C compris entre 125 et 75, la perte due à l'oxyde de carbone varie de 50 à 80 %. Vraisemblablement, lorsque le rapport A/C est de l'ordre de 100, la quantité d'hydrocarbures imbrûlés est plus importante.

A la sortie de la chambre, dans la section S, le rendement de combustion est amélioré et la perte provenant de l'oxyde de carbone représente 20 à 40 % de la perte totale;

g) les différentes quantités mesurées peuvent être comparées aux concentrations et températures théoriques calculées précédemment (Chapitre Premier).

Dans la région de combustion propre (section P) les quantités mesurées n'atteignent pas les valeurs théoriques :

Les concentrations en CO_2 théoriques sont très supérieures aux valeurs $(\overline{\text{CO}_2 \text{ réel}})_P$ mesurées.

Inversement, les quantités de CO calculées sont inférieures aux concentrations $(\text{CO})_P$.

Par suite, les températures mesurées sont évidemment plus faibles que les températures théoriques.

Mais, les températures mesurées étant de l'ordre de 1 500° C, la précision des mesures effectuées est assez incertaine. Cette incertitude peut être levée grâce aux données de l'analyse des gaz et à la connaissance des rapports $(\overline{\text{A/C}})_P$. Si nous admettons que le rendement de combustion η_c mesuré par analyse de gaz est identique (aux erreurs de définition près) au rendement thermique η_t (§ 1,7.3) nous pouvons écrire :

$$(80) \quad \frac{(\text{CO}_2 \text{ réel})_P}{(\text{CO}_2 \text{ total})_P} = (\eta_c)_P = (\eta_t)_P = \frac{(\Delta T \text{ réel})_P}{(\Delta T \text{ théorique})_P}.$$

Nous connaissons le rendement $(\eta_c)_P$ et l'élévation théorique de température est déterminée à partir des courbes calculées précédemment au moyen des rapports $(\overline{\text{A/C}})_P$.

Par suite, on peut donc calculer une température :

$$(81) \quad (T'_3)_P = (\bar{\eta}_c)_P \times (\overline{\Delta T \text{ théorique}})_P + T_0,$$

qui devrait être identique à la température mesurée $(T_3)_P$. La comparaison de ces températures montre que $(T'_3)_P$ est toujours supérieur à $(T_3)_P$ (fig. 33) et la sonde de température conduit à une erreur :

$$(82) \quad \frac{\Delta T}{T} \% = 100 \times \frac{(T'_3)_P - (T_3)_P}{(T'_3)_P}$$

comprise entre 2 et 11 %.

Cette erreur croît avec la température à repérer, et les mesures faites manquent de précision malgré les soins apportés à la réalisation de la sonde. Cependant, si nous

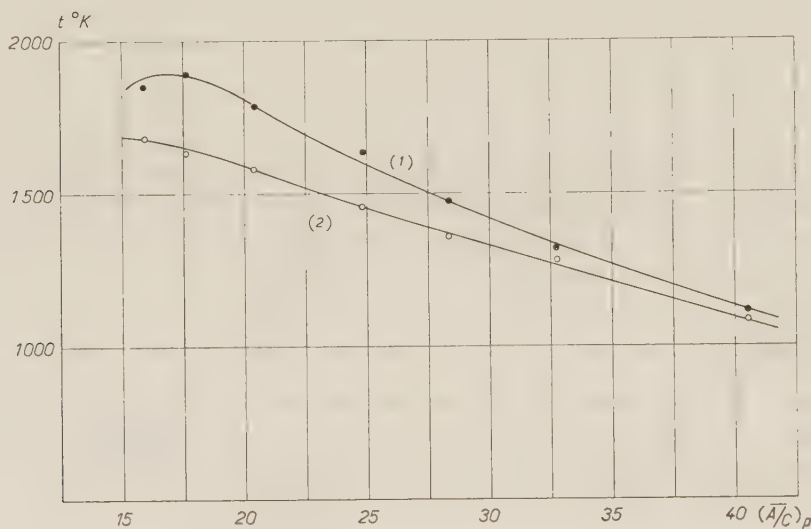


Fig. 33. — Zone primaire P.
Comparaison des températures mesurées et calculées.
(1) températures calculées t'_3 — (2) températures mesurées $(t_3)_P$.

tenons compte des difficultés rencontrées pour mesurer une température élevée dans un écoulement hétérogène à grande vitesse (§ 2,3.2), l'erreur de 11 % à la température maximum n'est pas aberrante.

Nous remarquerons que la méthode de détermination des températures, à partir des rapports Air/Combustible et des rendements de combustion, peut être appliquée à d'autres foyers de combustion. Cette méthode donne la possibilité de connaître les températures dans un domaine de mesure où l'emploi des thermo-couples est assez hasardeux.

A la sortie de la chambre (section S) les valeurs mesurées, températures et concentrations en CO_2 , sont très proches des valeurs théoriques, comme nous l'avons vu précédemment (fig. 11). L'intervention de l'air de dilution a amélioré la combustion et le rendement η est compris entre 0,90 et 0,98.

3,3 RECHERCHE DES CONCENTRATIONS EN OXYDE NITRIQUE PRÉSENTES DANS LES GAZ DE COMBUSTION

L'étude des dissociations possibles (Chapitre Premier) a montré que l'oxyde nitrique pouvait exister à des concentrations plus grandes que d'autres produits de dissociation. La recherche du NO présent dans les gaz de combustion devait donc être entreprise.

3,3.1 Le principe de la méthode de dosage que nous avons utilisée est dû à GUYER et WEBER [29]. Cette méthode avait été appliquée par HOLLINGS aux gaz de cockeries [30].

Les gaz de combustion barbottent dans une solution de permanganate acide ($\text{MnO}_4\text{K} + \text{SO}_4\text{H}_2$); s'il existe du NO, il est oxydé en acide nitreux qui, réagissant sur le

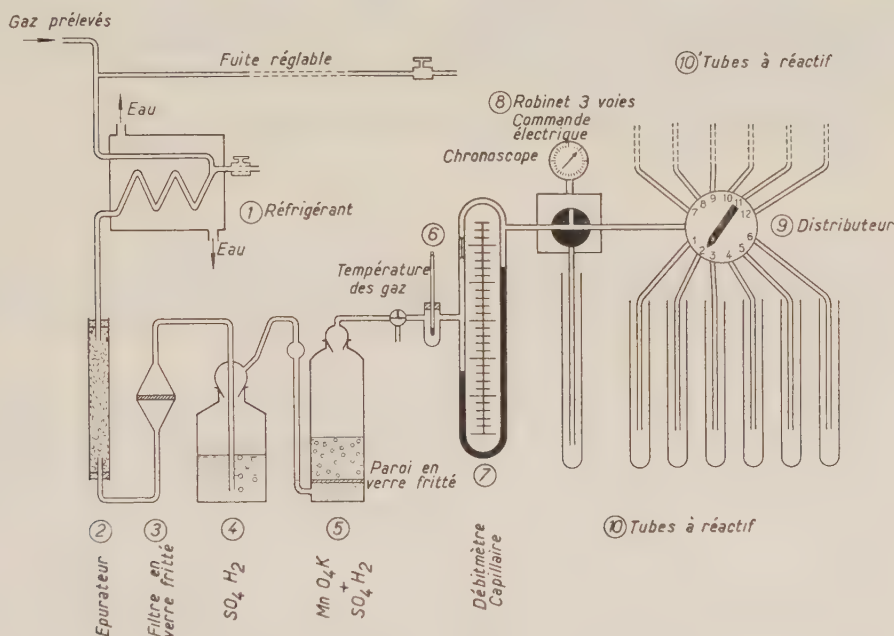


Fig. 34. — Schéma de l'appareil de dosage du NO.

réactif de GRIESS-HOSVAY (α — naphtylamine + acide sulfanilique) donne un diazoïque coloré en rose. L'intensité de la coloration du réactif est proportionnelle à la quantité de NO contenue dans les gaz.

Pour étudier les gaz d'échappement des chambres de combustion de turboréacteur nous avons réalisé un appareil de dosage qui, tenant compte des conditions d'expérimentation, permet d'effectuer rapidement de nombreuses mesures.

La figure 34 montre le schéma de principe de cet appareil.

Un débitmètre à capillaire permet de mesurer la quantité de gaz traversant l'appareil. On repère la température des gaz au moyen d'un thermomètre placé immédiatement en amont (correction de débit).

A la sortie du débitmètre les gaz peuvent être envoyés au moyen d'un robinet trois voies soit dans l'atmosphère, soit dans les tubes contenant le réactif de GRIESS-HOSVAY. La manœuvre de ce robinet déclenche automatiquement un chronoscope; on mesure ainsi le temps de passage des gaz dans le réactif. Un distributeur placé dans le circuit des gaz (*fig. 34*) alimente successivement douze tubes à réactif et donne ainsi la possibilité d'effectuer les mesures en série.

3,3.2 Méthode de dosage : au moyen d'une fuite réglable, commandée par un robinet-pointeau, on règle le débit gazeux de manière à se trouver dans les meilleures conditions d'oxydation du NO en NO₂. Ce débit doit être compris entre 6 et 9 cc/s. Puis, au moyen du robinet trois voies, on envoie les gaz dans le réactif qui devient rose-rouge violacé au bout d'un certain temps t . Connaissant le temps de passage t des gaz dans le réactif, mesuré au chronoscope, et le débit Q cc/s, indiqué par le débitmètre à capillaire, on en déduit le volume de gaz V^{cc} qui a traversé l'appareil. Après expérience, le réactif est soigneusement recueilli dans une fiole jaugée de 100 cc; dans une deuxième fiole jaugée de 100 cc contenant du réactif pur, on ajoute X^{cc} d'une solution titrée de nitrite de sodium jusqu'à obtention de l'égalité des colorations.

La concentration volumétrique en NO est donnée par :

$$(83) \quad C_{NO} = K \frac{X}{V}, \quad K = C^{te}.$$

Le développement de la coloration du réactif de GRIESS par le nitrite de sodium étant assez lent, on peut, pour faciliter les dosages, réaliser des étalons colorés. La fuchsine, en solution nitrique convenablement diluée, permet d'obtenir des étalons colorés relativement stables dans le temps.

Le mode de préparation des différentes solutions d'acide sulfurique, de permanganate, de nitrite de sodium, etc., est indiqué dans certains traités de Chimie [31], [32]. Ces solutions doivent être préparées dans des conditions bien définies. En particulier, l'emploi d' α -naphtylamine très pure est indispensable pour la préparation du réactif de Griess. Or, l' α -naphtylamine commerciale contient souvent 1 % d'impuretés qui la colorent en violet; cette coloration gêne évidemment le dosage colorimétrique. Aussi, il est nécessaire d'éliminer ces impuretés, et pour cela, nous avons utilisé la différence de solubilité de l' α -naphtylamine dans l'eau (0,167 %) et dans l'alcool (1 000 %).

3,3.3 Précision de la méthode de dosage.

Cette méthode est caractérisée par une grande sensibilité [29], [30], ainsi on apprécie facilement de faibles colorations qui correspondent à des concentrations en NO de l'ordre de 1×10^{-6} . Malheureusement, comme la plupart des méthodes colorimétriques, la précision est assez défectueuse.

L'erreur sur la concentration est égale à :

$$(84) \quad \frac{d(C_{NO})}{C_{NO}} = \frac{dK}{K} + \frac{dX}{X} + \frac{dQ}{Q} + \frac{dt}{t}.$$

Le facteur K caractérise le taux d'oxydation du NO en NO₂ par le permanganate

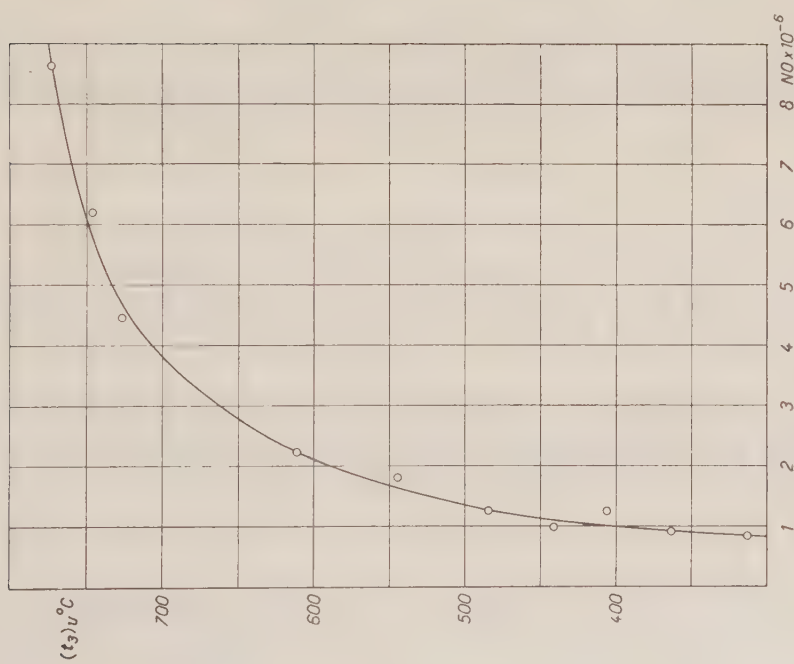


Fig. 35. — Concentrations in NO mesurées dans la section U en fonction de la température.

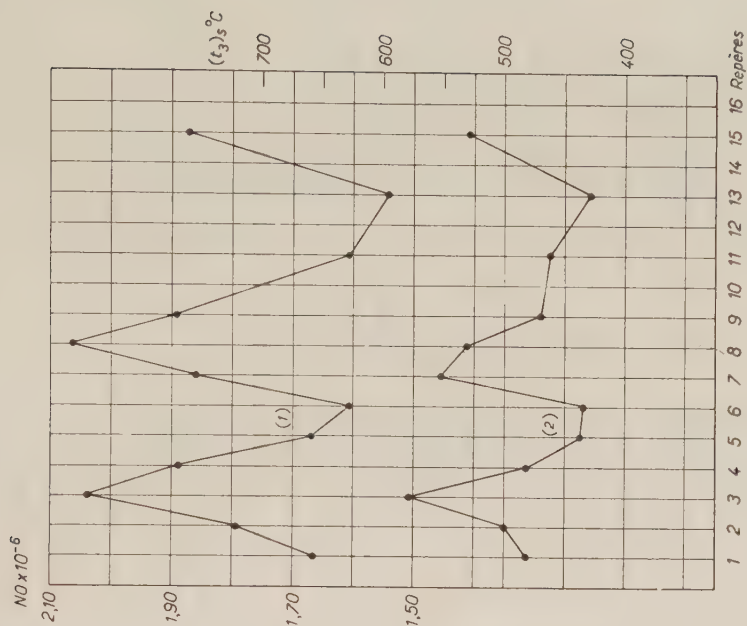


Fig. 36. — Exploration à la sortie de la chambre, Section S — A/C = 90,5.
(1) Concentrations en NO. — (2) Températures.

acide. En supposant $K = C^{\text{te}}$, comme nous l'avons fait, on peut commettre une erreur de l'ordre de 5 %.

L'erreur sur X est au maximum de 4 %.

L'erreur sur le débit Q est de l'ordre de 1 %.

Quant à l'erreur sur le temps t , mesuré au $1/100^{\text{e}}$ de seconde, et de l'ordre de plusieurs minutes, elle est négligeable devant les erreurs précédentes.

En définitive, l'erreur maximum sur les concentrations mesurées est de l'ordre de 10 %.

3.3.4 Mesure des concentrations en oxyde nitrique.

Les quantités d'oxyde nitrique présentes dans les gaz de combustion de la chambre de turboréacteur Lucas-Derwent I ont été recherchées dans les différentes sections conventionnelles U, S, P, N définies sur l'installation de combustion décrite précédemment (*fig. 9*) (§ 3,1).

SECTION U.

A la sortie de l'uniformiseur les concentrations en NO mesurées augmentent en fonction du rapport C/A. Or, nous avons vu (§ 1,7) que les températures mesurées varient dans le même sens que le rapport C/A; donc, les concentrations en NO évoluent comme les températures (t_3)_v (*fig. 35*) et nous pouvons écrire :

$$(86) \quad \text{NO \%} = \varphi (\Delta T \text{ réel}).$$

Nous remarquerons que la quantité de NO existant dans les gaz de combustion est toujours très faible et inférieure à 1/1 000 % quel que soit le rapport Air/Combustible considéré.

SECTION S.

Dans la section de sortie de la chambre où le flux est hétérogène nous avons effectué des prélèvements de gaz et repéré les températures en douze points de cette section. Chaque exploration a été faite à $A/C = C^{\text{te}}$ et répétée pour différentes valeurs du rapport A/C.

L'examen des diagrammes représentatifs de ces explorations, construits en portant en abscisses les douze points repères et en ordonnées concentrations en NO et températures, montre la liaison étroite existant entre ces deux quantités (*fig. 36*).

SECTION P.

Les explorations faites sur un diamètre de cette section, immédiatement en aval de la flamme, n'ont donné aucun résultat. Quel que soit le rapport Air/Combustible, le point de prélèvement et le temps de passage des gaz dans l'appareil, on n'observe pratiquement pas de coloration du réactif de GRIESS-HOSVAY.

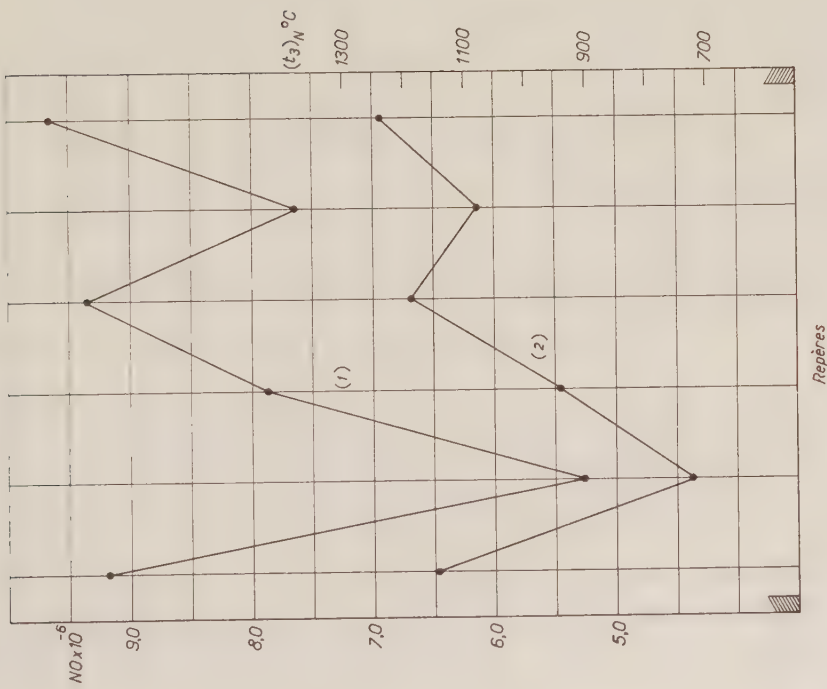


Fig. 37. — Exploration. Zone de dilution. Section N — A/C = 48,3
(1) Concentrations en NO. — (2) Températures.

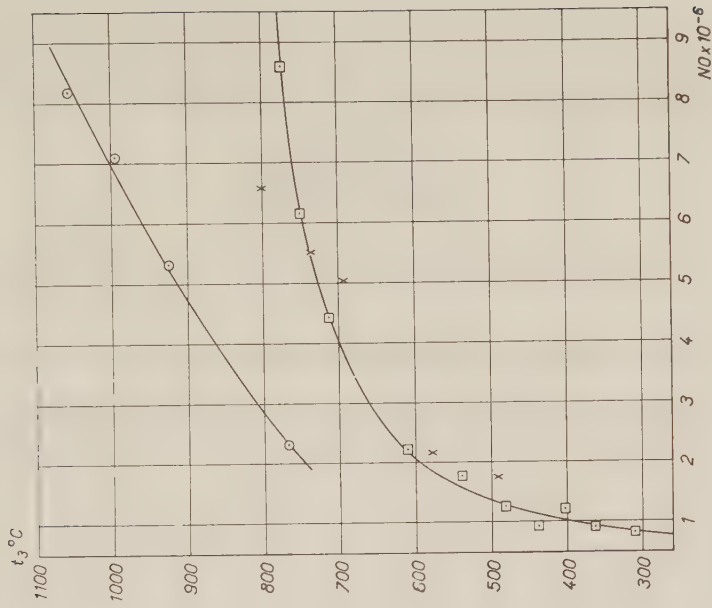


Fig. 38. — Concentrations en NO — Section U.
× Concentrations $(NO)_s$ — Section S ○ Concentrations $(NO)_n$ — Section N.

SECTION N.

Au contraire, dans cette section, une certaine quantité d'oxyde nitrique apparaît aux différents points du diamètre exploré (*fig. 37*). Les concentrations d'oxyde nitrique varient localement dans le même sens que les températures. Ce résultat est également valable si nous considérons les valeurs moyennes :

$$(\overline{\text{NO}})_N = \frac{\sum_1^6 (\text{NO})_N}{6}$$

en fonction des températures $(\overline{t_3})_N$ (*fig. 38*).

3,3.5 Interprétation des résultats obtenus.

a) Les gaz de combustion des mélanges Air-Kérosène renferment de l'oxyde nitrique à des concentrations inférieures à 0,001 %, en flux homogène ou hétérogène,

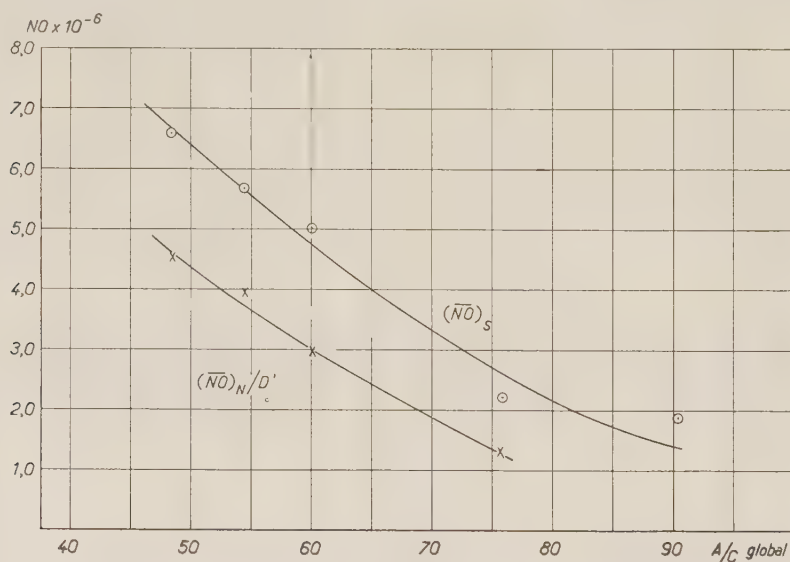


Fig. 39.

quel que soit le lieu de prélèvement des gaz. Ce résultat n'est pas particulier à la chambre de turboréacteur Lucas-Derwent I car, au cours d'essais antérieurs sur une chambre différente, la Jumo 0-04, nous avons trouvé des concentrations en NO du même ordre (de 0,05 à 0,005 %). La présence du NO, à l'état de traces, dans les gaz issus de la combustion du kérosène semble donc probable.

b) Les concentrations moyennes $(\overline{\text{NO}})_S$ dans la section S correspondent aux concentrations $(\text{NO})_C$ mesurées à la sortie de l'uniformiseur (*fig. 38*). Donc les très faibles quantités de NO existant dans les gaz paraissent ne pas évoluer en traversant l'uniformiseur.

c) Les concentrations moyennes $(\text{NO})_S$ et $(\overline{\text{NO}})_N$ peuvent être comparées grâce

à la connaissance du facteur de dilution D' dans la section N. Il est déterminé par les équations :

$$(86) \quad \left(\frac{A}{C}\right)_{\text{mesuré}}^{\text{global}} = \left(\frac{\bar{A}}{\bar{C}}\right)_N \times D',$$

et :

$$(87) \quad D' = \frac{(\overline{\text{CO}_2 \text{ total}})_N}{(\overline{\text{CO}_2 \text{ total}})_S},$$

analogues à celles écrites pour définir la dilution D dans la section P (§ 3,2.2). Les calculs effectués montrent que D' est compris entre 1,8 et 2,2.

En tenant compte de la dilution D' la comparaison des quantités $\frac{(\text{NO})_N}{D'}$ et $(\text{NO})_S$ indique que la proportion d'oxyde nitrique présente dans la section N est inférieure à celle existant dans la section S, quel que soit le rapport Air / Combustible (*fig. 39*).

Ces résultats permettent d'interpréter ainsi le mécanisme de formation de l'oxyde nitrique : le mélange Air-Kérosène brûle dans la chambre de combustion en donnant un flux de gaz chauds riche en CO et CO_2 , donc renfermant vraisemblablement peu d'oxygène. Par suite, la concentration en O_2 est trop faible pour que l'oxyde nitrique puisse se former dans la section P. Au contact de l'oxygène apporté par l'air de dilution, les gaz chauds qui contiennent de 60 à 70 % de N_2 entrent en réaction et produisent une faible quantité de NO dans la section N. La quantité d'oxyde nitrique formée s'accroît jusqu'à la sortie de la chambre où l'air de dilution en excès refroidit les gaz et arrête la réaction.

Les concentrations d'oxyde nitrique mesurées sont très inférieures à celles calculées à partir des données thermo-chimiques de l'équilibre $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{NO}$ (Chapitre Premier). Ce résultat était prévisible, les conditions de formation de l'oxyde nitrique dans la chambre de turboréacteur n'étant pas favorables.

Les conditions de formation du NO ont été étudiées notamment par NERNST [33], HABER [34] et FINK [35]. Des travaux récents sur la formation de l'oxyde nitrique au cours de la combustion et des explosions ont été effectués par ZELDOVICH [36], FRANK-KAMENETZKY [37] et POLYAKOV [38]. Selon ces derniers auteurs, la proportion de NO formée dans une combustion suit le mécanisme de réaction $\frac{1}{2} \text{N}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO}$, croît constamment avec la température et dépend non seulement des quantités d'oxygène et d'azote en présence mais surtout de la chaleur de combustion du mélange. La nature du combustible n'intervient pas et la réaction chimique de formation est donc purement thermique. De plus, si la combustion prend place dans un courant gazeux, le NO se forme après combustion lorsque le combustible est complètement brûlé.

Les résultats de ces auteurs, obtenus à partir de mesures précises, sont en accord avec l'interprétation que nous avons donnée de la formation du NO dans une chambre de turboréacteur et ils expliquent la liaison étroite observée entre concentration en NO et température.

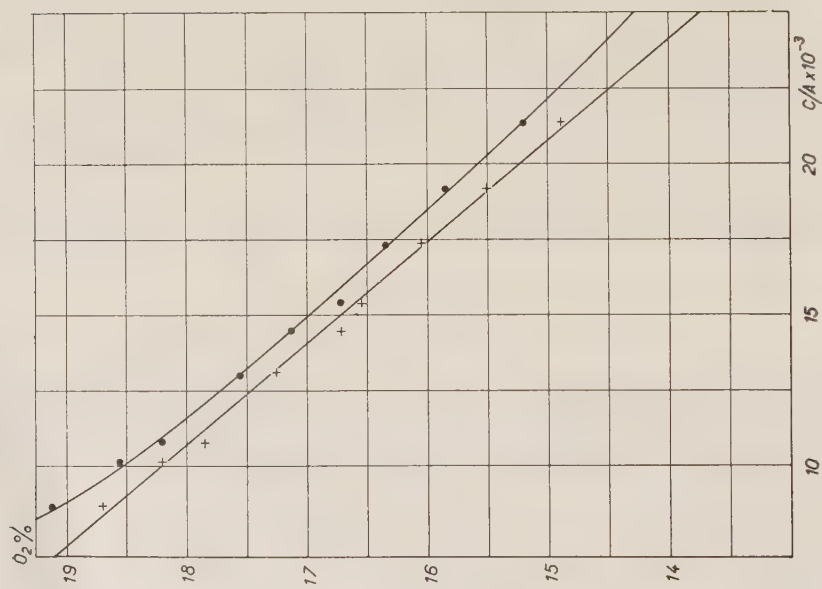


Fig. 40. — Concentrations O_2 réel • O_2 total + mesurées à la sortie de l'uniformiseur. — Section U.

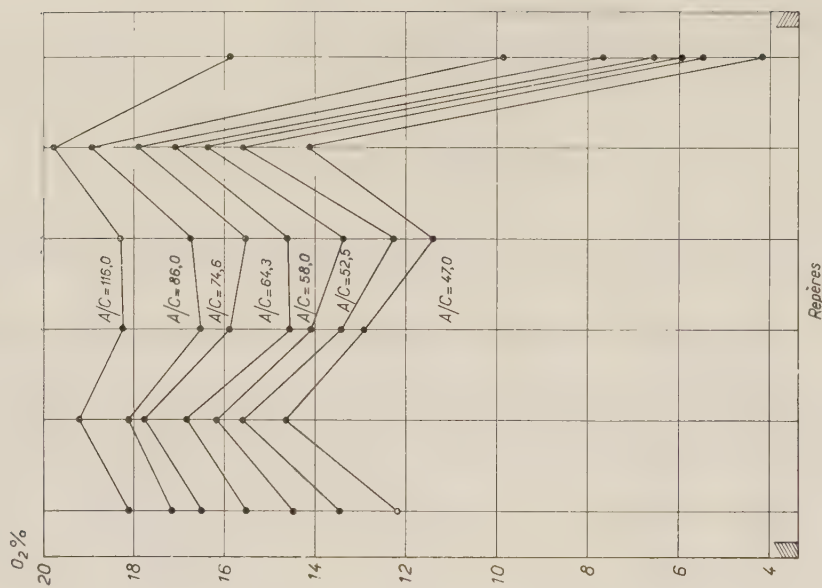


Fig. 41. — Concentrations on O_2 réel Exploration Zone de dilution. Section N.

MESURE DES CONCENTRATIONS EN OXYGÈNE

La mesure des quantités d'oxygène présentes dans les gaz d'échappement a été entreprise afin de rechercher si, pour certains rapports Air /Combustible, la teneur en O_2 s'abaissait suffisamment dans la section P pour provoquer l'apparition de quantités de CO importantes et empêcher la formation du NO.

3,4.1 Appareils et méthode de mesure.

On utilise la méthode d'analyse des gaz décrite dans le paragraphe 2,2 et mise au point pour mesurer les concentrations de CO et de CO_2 . Mais, l'analyseur de gaz infra-rouge (§ 2,1.1) est remplacé par un analyseur d'oxygène. Cet appareil réalisé par K. LUFT [39] utilise les propriétés paramagnétiques de l'oxygène. Le principe consiste, en appliquant un champ magnétique modulé, à détecter les variations de pression provoquées dans les gaz à analyser avec un condensateur à membrane sensible et à amplifier et mesurer la tension alternative produite par le condensateur.

L'appareil de K. LUFT possède les avantages suivants : analyse continue du gaz, mesure exacte de la susceptibilité sans interférence d'autres qualités du mélange, sensibilité de l'ordre de 0,04 % de O_2 , temps de réponse d'une seconde environ.

3,4.2 Cet analyseur permettant un dosage continu du gaz était immédiatement adaptable à notre méthode d'analyse (§ 2,2). Sur le premier circuit de mesure (*fig. 10*) on détermine la quantité d'oxygène non utilisée dans la combustion : O_2 réel; sur le second circuit, on mesure la concentration d'oxygène qui devrait subsister si la combustion était totale et parfaite. Nous avons appelé (§ 1,2.1) cette concentration O_2 total.

Les quantités d'oxygène présentes dans les gaz ont été mesurées dans les différentes sections de l'installation de combustion :

SECTION U.

A la sortie de l'uniformiseur les concentrations O_2 total varient linéairement avec le rapport C /A. La teneur en O_2 réel dépend du rendement de combustion (*fig. 40*). Cette expérience a été faite dans le but de vérifier le bon fonctionnement de l'appareillage et la précision sur les concentrations mesurées. La comparaison des valeurs O_2 total mesurées avec les valeurs théoriques conduit à un écart $\Delta (O_2) / (O_2)$ de l'ordre de 1 %.

SECTION S.

Des mesures de concentrations en oxygène n'ont pas été entreprises dans cette section. Nous avons vu que les valeurs moyennes des concentrations en CO_2 réel et total mesurées dans la section S correspondaient aux valeurs déterminées dans la section U. On trouverait certainement un résultat semblable pour l'oxygène. Mais ces mesures seraient inutiles, car elles n'apporteraient aucun renseignement sur l'évolution de la combustion.

SECTION N.

Des explorations sur un diamètre de la section ont été faites pour différentes valeurs du rapport A/C (fig. 41). Le profil des concentrations en oxygène réel correspond exactement, pour un rapport A/C semblable, au profil des concentrations en CO_2 (fig. 24, 25) en effectuant une rotation de 180° autour de l'axe des repères. La quantité d'oxygène restante est donc d'autant plus faible que la proportion de CO_2 formée est plus forte. Or, la quantité de CO_2 , en un point donné, dépend uniquement de la densité de combustible. Si celle-ci est trop grande il se forme de l'oxyde de carbone et la quantité d'oxygène

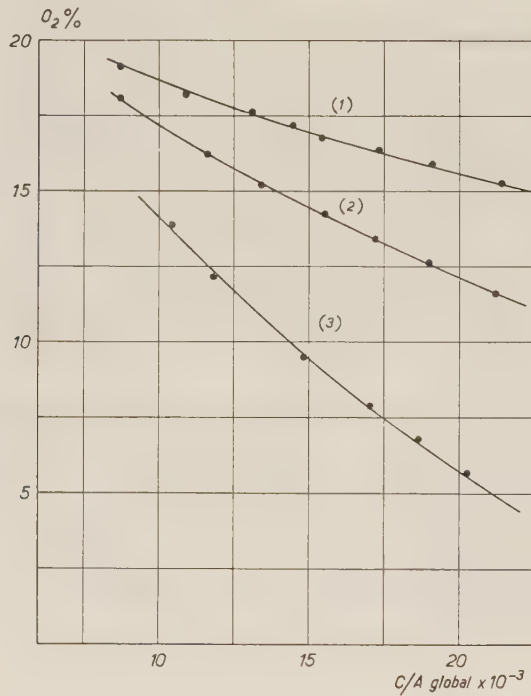


Fig. 42. — Concentrations moyennes en O_2 réel mesurées dans les différentes sections de l'installation de combustion.

(1) O_2 réel — Section U. — (2) O_2 réel — Section N. — (3) O_2 réel — Section P.

qui subsiste doit être minimum. On observe ce fait en comparant, par exemple, les quantités CO , CO_2 réel et CO_2 total mesurées à une des extrémités du diamètre exploré (fig. 25, 27) pour un rapport $A/C = 45$, avec la concentration d'oxygène restant au même point pour un rapport A/C voisin égal à 47 (fig. 41).

SECTION P.

Les explorations effectuées dans cette section suggèrent des remarques identiques, si l'on compare le profil de variation des concentrations en oxygène établi pour un rapport A/C donné avec les concentrations en CO et CO_2 mesurées précédemment. Cepen-

dant, les valeurs des concentrations $(O_2 \text{ réel})_p$ sont beaucoup plus faibles que celles mesurées dans la section N et, surtout, aux points où de fortes concentrations d'oxyde de carbone apparaissent, la concentration d'oxygène réel devient très petite et, dans certains cas, inférieure à 1 %.

Cette différence entre les sections N et P apparaît davantage si l'on considère les valeurs moyennes $(O_2 \text{ réel})_N$ et $(O_2 \text{ réel})_P$ en fonction du rapport C/A (fig. 42). Les concentrations $(O_2 \text{ réel})_P$ deviennent inférieures à 8 % à partir d'un C/A global de l'ordre de 17×10^{-3} ($A/C < 59$) et diminuent très rapidement. *Or, c'est précisément à partir de cette valeur du A/C que la concentration moyenne en oxyde de carbone devient notable dans la section P (fig. 23).*

En définitive, la mesure des concentrations en oxygène fournit des résultats qui confirment les interprétations précédemment faites :

— l'existence de l'oxyde de carbone en proportion notable dans la section P provient d'une oxydation incomplète des atomes de carbone due à un manque d'oxygène;

— la combustion s'améliore entre les sections P et S grâce à l'oxygène apporté par l'air de dilution;

— la configuration de l'écoulement dans la chambre évolue avec le rapport A/C, mais on retrouve sensiblement le même profil pour un rapport A/C donné quel que soit le constituant dosé dans le mélange;

— les concentrations en oxygène, dans la section P, étant faibles par rapport aux concentrations d'azote, on conçoit que l'oxyde nitrique ne se forme pas dans cette section.

3,5

PROCESSUS DE COMBUSTION DU KÉROSÈNE

Les analyses de gaz et les mesures de température, faites dans les différentes sections de l'installation de combustion, permettent d'interpréter ainsi le processus de combustion des mélanges Air-Kérosène dans une chambre de turboréacteur.

Le combustible injecté dans le courant d'air brûle après vaporisation partielle ou totale en mélange relativement riche. Les mesures faites en aval de la flamme ont montré que les rapports Air/Combustible varient entre 15 et 40. De ce fait, les températures assez élevées atteintes par les gaz évoluent entre 1 000 et 1 500° C. La répartition du combustible n'étant pas homogène, une partie du combustible brûle en mélange riche, l'autre en mélange pauvre, et il se forme localement de l'oxyde de carbone, en proportion importante, qui est dû à une oxydation incomplète des atomes de carbone. Le rendement de cette combustion est au maximum de 0,90 et s'abaisse jusqu'à 0,78 lorsque la quantité de combustible utilisée est maximum.

Au contact de l'air de dilution, qui apporte de l'oxygène, la combustion se poursuit. Les imbrûlés, en particulier CO, sont oxydés en CO₂, il se forme un peu de NO; puis, l'air de dilution en excès refroidit les gaz et arrête la réaction de combustion. Par suite, les gaz d'échappement à la sortie de la chambre ont une température moyenne comprise entre 300 et 880° C, le rendement de combustion, considérablement amélioré,

varie de 0,90 à 0,98 et les quantités mesurées correspondent assez bien aux quantités théoriques calculées.

Ce processus de combustion du kérosène reste vraisemblablement valable pour toutes les chambres de turboréacteur réalisées sur le même principe que la chambre Lucas-Derwent I. Pour mettre en évidence ce processus, de nombreuses mesures ont été nécessaires et la méthode d'analyse de gaz continue nous a permis de les effectuer.

Cependant, l'ensemble des résultats obtenus ne concerne que les gaz brûlés issus de la combustion des mélanges Air-Kérosène et aucune mesure n'a été effectuée sur la flamme elle-même. Aussi, il nous a semblé nécessaire, de rechercher les caractéristiques de la flamme : vitesse de propagation, température, etc., et d'étudier son comportement en fonction des conditions initiales du mélange. Ce travail sera exposé dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DE LA FLAMME DES MÉLANGES AIR-KÉROSÈNE

Dans une chambre de turboréacteur la flamme présente des caractères complexes. Les orifices d'entrée de l'air primaire sont généralement conçus (*fig. 10*) pour créer dans l'écoulement une dépression qui provoque des « courants de retour » et des tourbillons du flux. Le combustible injecté, dont la répartition n'est pas uniforme, est entraîné dans ces tourbillons où la flamme prend naissance. A la périphérie du tube de flamme, des orifices laissent circuler un courant d'air frais, destiné à limiter l'échauffement des parois, qui influence la flamme.

Celle-ci se propage donc en flux très hétérogène dans des conditions mal définies. Par suite, la détermination des caractéristiques de la flamme des mélanges Air-Kérosène ne pouvait être entreprise en utilisant comme foyer une chambre de turboréacteur.

Nous avons pensé que les caractéristiques de la flamme pouvaient être recherchées si nous disposions d'un brûleur donnant une « flamme à cône bleu ». En effet, dans ce cas, l'application de la méthode de GOUY [40] permettrait de mesurer les vitesses de propagation et la méthode de FERY [41] donnerait la possibilité de repérer les températures. Pour atteindre ces buts, nous avons réalisé un brûleur qui donne une flamme à cône bleu [60].

4,1

RÉALISATION D'UN BRÛLEUR AIR-KÉROSÈNE

L'installation expérimentale se compose d'un brûleur, alimenté par deux circuits indépendants Air et Combustible.

4,1.1 Le brûleur est constitué par un tube de laiton dont la longueur est égale à quinze fois le diamètre (*fig. 43*). L'air qui peut être préchauffé pénètre dans le brûleur par un « nid d'abeilles » destiné à régulariser le flux. Une sonde thermo-électrique permet de repérer la température de l'écoulement. En aval du nid d'abeilles est situé l'injecteur qui introduit dans l'écoulement le kérosène pulvérisé. Au sommet du brûleur on peut installer :

- des grilles à mailles fines pour homogénéiser le mélange Air-Combustible;
- des tuyères profilées en duralumin, de sections différentes, qui permettent de modifier la vitesse d'écoulement du mélange.

En amont de la section de sortie une sonde thermo-électrique a été placée pour repérer la température du mélange immédiatement avant combustion.

Ce brûleur est soigneusement calorifugé au moyen de feutre de verre et d'amiante pour éviter les pertes calorifiques vers le milieu extérieur.

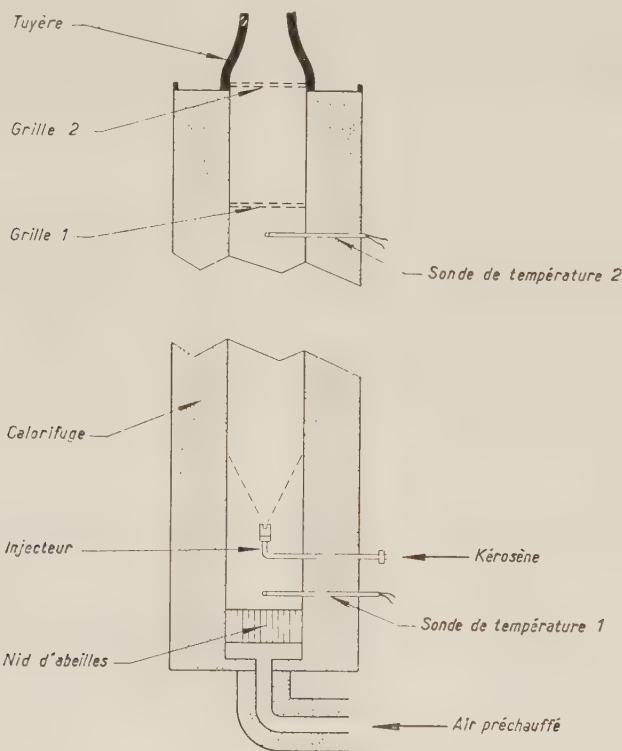


Fig. 43. — Brûleur Air-Kérosène.

L'air nécessaire au fonctionnement de ce brûleur est fourni par un compresseur. A la sortie du compresseur, l'air traverse un diaphragme qui permet de mesurer le débit Q_A g/s défini par les équations classiques :

$$(89) \quad Q_A \text{ g/s} = K \sqrt{\Delta p} \sqrt{\rho},$$

et :

$$\rho = \rho_0 \times \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T},$$

K représente un coefficient constant;

Δp est la dépression au col du diaphragme que nous mesurons avec un manomètre à eau;

ρ définit la densité de l'air dans les conditions de pression p et de température T par rapport aux conditions normales ρ_0 , p_0 , T_0 . Les deux quantités p et T sont mesurées, respectivement, par un manomètre métallique préalablement étalonné, et par un thermomètre, placés en amont du diaphragme.

Une tuyauterie métallique achemine l'air sortant du diaphragme vers le four électrique de préchauffage. On règle le chauffage de ce four au moyen d'un rhéostat. Après préchauffage, l'air pénètre dans le brûleur.

Le combustible alimentant ce brûleur provient d'un réservoir, placé en charge sur l'installation. Le kérosène contenu dans ce réservoir circule à travers :

- un filtre à mailles fines F_1 qui retient les corps étrangers;
- un filtre F_2 dont le rôle est d'arrêter les poussières de dimension égale ou supérieure à 5μ ;
- un rotamètre préalablement étalonné qui permet de mesurer le débit de combustible Q_c g/s. On repère la température du combustible au moyen d'un thermomètre placé en amont du rotamètre.

Après passage dans cette série d'appareils, le combustible parvient à une petite pompe à engrenages entraînée par un moteur électrique dont la vitesse peut être réglée au moyen d'un rhéostat. Cette pompe alimente l'injecteur sous une pression d'injection qui varie comme la vitesse de rotation et le débit Q_c g/s. On mesure la pression d'injection avec un manomètre métallique. En amont de l'injecteur, un micro-filtre F_3 arrête les petites poussières qui, n'ayant pas été stoppées par les filtres précédents, risqueraient d'obstruer les orifices de l'injecteur.

La réalisation de l'injecteur a présenté des difficultés dues à la nécessité d'obtenir une bonne pulvérisation pour de très faibles débits de combustible, à l'échelle de l'installation utilisée. En adoptant le principe de la pulvérisation par tourbillons, un injecteur donnant satisfaction a été mis au point.

4.1.2 Caractéristiques de l'installation.

Ce brûleur a des possibilités de fonctionnement limitées par la gamme de débits pour laquelle l'injecteur donne une bonne pulvérisation. Ce débit Q_c peut varier de 0,19 à 0,50 g/s pour des pressions d'injection de 1 à 12 kg/cm² qui correspondent à des vitesses de rotation de la pompe de 1 000 à 6 000 tr/mn.

Le débit d'air Q_a peut évoluer entre 2 et 6 g/s. Au débit maximum, le four de préchauffage peut amener l'air jusqu'à la température de 250° C.

A la sortie du brûleur, en utilisant des tuyères de sections différentes (diamètres compris entre 4 et 5,6 cm), on peut modifier la vitesse de l'écoulement de 200 à 500 cm/s. A ces vitesses correspondent des nombres de Reynolds de 3 000 et 7 000.

4,2

PROPAGATION DE LA FLAMME DANS DES ÉCOULEMENTS LAMINAIRES ET TURBULENTS

L'écoulement à la sortie du brûleur est caractérisé par le nombre de Reynolds :

$$(90) \quad R_e = \frac{VD}{\nu}$$

en appelant :

V la vitesse moyenne du mélange Air-Combustible;

D le diamètre du tube du brûleur dans la section de sortie;

ν la viscosité cinématique du mélange Air-Combustible à la température $t^\circ\text{C}$ considérée.

Si R_e est inférieur à 2 300 l'écoulement est laminaire et si R_e est supérieur à 3 000 l'écoulement est turbulent. Lorsque R_e est compris entre 2 300 et 3 000, le régime possède des propriétés transitoires assez mal définies.

4,2.1 Le brûleur fonctionnant pour des nombres de Reynolds compris entre 3 000 et 7 000 donne donc des flammes turbulentes. Avant de déterminer la vitesse de propagation des flammes turbulentes, il était nécessaire de mesurer les vitesses fondamentales de propagation laminaire. De nombreux travaux ont été effectués sur les mélanges Air-Combustible gazeux [42] (voir également références [61] à [74]); par contre, les combustibles liquides ont été peu étudiés [43], [44]. L'écoulement laminaire s'obtient aisément pour les combustibles gazeux en utilisant des tubes de petits diamètres et des vitesses du mélange faibles; ainsi, on abaisse le nombre de Reynolds en dessous de la valeur critique 2 300. Les faibles vitesses du mélange gazeux correspondent à de faibles débits masses $Q_M = Q_A + Q_C$ car $Q_M = \rho_M VS$. (S étant la surface de la section de sortie du brûleur et ρ_M la densité du mélange à la température $t^\circ\text{C}$ considérée).

Or, la flamme ne peut se propager que pour une gamme de rapports Air/Combustible bien définie (limites d'inflammabilité); par suite, les faibles vitesses d'écoulement ne peuvent être obtenues dans des tubes de petits diamètres que pour des valeurs faibles de Q_C et de Q_A .

Ces considérations peuvent être appliquées au combustible liquide kérosène. Le brûleur réalisé donne une flamme turbulente stable pour des vitesses d'écoulement du mélange inférieures à 500 cm/s. Dans ce cas, le diamètre de la section de sortie est compris entre 4 et 5,6 cm. Pour obtenir un écoulement laminaire en conservant les mêmes vitesses, il serait nécessaire d'utiliser des tubes étroits de 1 à 2 cm de diamètre et des débits Q_M inférieurs à 2 g/s. Ce débit-masse correspond, au rapport A/C stoechiométrique à un débit de combustible Q_C de l'ordre de 0,04 g/s. Malheureusement, l'injecteur qui est à la limite des possibilités d'usinage ne peut produire une bonne pulvérisation pour des débits aussi petits.

Dans l'impossibilité d'obtenir un écoulement laminaire avec l'injecteur mis au point, nous avons envisagé :

— d'introduire dans l'écoulement turbulent sortant du brûleur un tube suffisamment long et étroit;

— de n'utiliser que le mélange Air-Kérosène sortant de ce tube pour entretenir une flamme laminaire;

— d'éliminer le surplus du mélange Air-Kérosène non utilisé.

Pour cela, le brûleur a été coiffé d'un pot d'échappement cylindrique en laiton (*fig. 44*) qui se fixe sur la tuyère de sortie du brûleur. Au sommet de ce pot, une pièce métallique filetée permet d'adapter différents tubes dont le diamètre varie de 0,6 à 1,8 cm et la longueur de 5,0 à 10,5 cm. A la partie inférieure du pot d'échappement

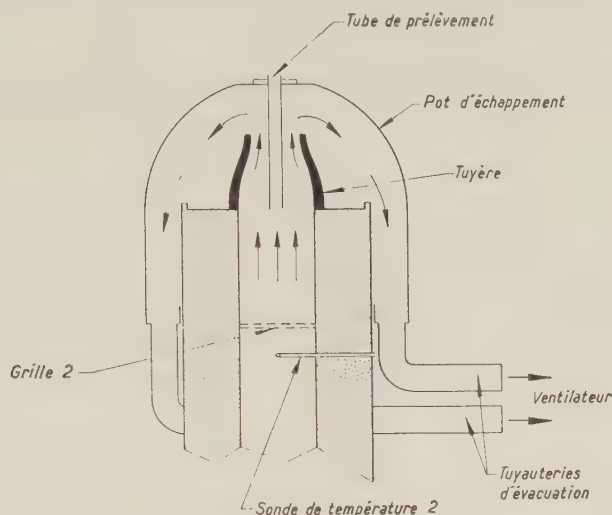


Fig. 44.

quatre tuyauteries souples recueillent le mélange Air-Combustible non utilisé. Elles convergent vers une tuyauterie unique qui achemine vers un ventilateur le mélange Air-Combustible non utilisé que l'on évacue à l'extérieur du laboratoire.

Ce dispositif a permis d'obtenir, nous le verrons plus loin, des flammes se propageant dans des écoulements laminaires.

La vitesse moyenne de l'écoulement à la sortie du brûleur est définie par la relation :

$$(91) \quad Q_M = \rho_M V_0 S,$$

($S = \frac{\pi D^2}{4}$ surface de la section de sortie de la tuyère).

A travers le tube de prélèvement, de diamètre d , qui permet d'obtenir des flammes laminaires, il passe une fraction q_M du débit total Q_M . Ce débit q_M est difficile à déterminer expérimentalement, car la pression à la sortie du brûleur est sensiblement égale à la pression atmosphérique. Ainsi, un tube de Pitot placé dans l'écoulement ne donne aucune

indication appréciable et ne permet pas de mesurer les vitesses, donc les débits. Ne pouvant déterminer q_M , nous avons été conduits à admettre que q_M et Q_M sont définis par le rapport des sections :

$$(92) \quad Q_M \times \frac{s}{S} = q_M \quad \text{avec} \quad s = \pi \frac{d^2}{4}$$

$$\text{et :} \quad q_M = \rho_M V_0 s.$$

Cette approximation est assez légitime, car les vitesses restent inférieures à 400 cm/s, la pression à la sortie du tube est de l'ordre de 1 atmosphère et la longueur du tube de prélèvement ne dépasse pas quelques centimètres. Les débits q_M ont été calculés à partir de cette approximation, et de la mesure des sections s , S et du débit masse total $Q_M = Q_A + Q_C$.

Le nombre de Reynolds à la sortie du tube placé dans l'écoulement est défini par :

$$(93) \quad R_e = \frac{V_0 d}{\nu}.$$

Avec l'appareil décrit, dans toutes les expériences faites, R_e est resté inférieur à 1 500 et la flamme obtenue présentait l'aspect d'un cône qui se rapprochait du cône parfait. Si l'on désigne par α l'angle formé par le plan tangent en chaque point du cône bleu et la section droite du tube, la vitesse de propagation laminaire est donnée par [40] :

$$v_l = v_0 \cos \alpha.$$

En étendant cette relation à toute la surface Σ du cône bleu, on obtient la vitesse fondamentale de déflagration laminaire V_l :

$$(94) \quad V_l = \frac{1}{\Sigma} \int_0^\Sigma v_l d\sigma,$$

$d\sigma$ étant l'élément d'aire découpé sur la flamme.

En intégrant :

$$(95) \quad V_l = V_0 \frac{s}{\Sigma},$$

et en tenant compte des équations précédentes :

$$(96) \quad V_l = \frac{q_M}{\rho_M \Sigma}.$$

Il a été montré [45], [46], [47] que l'évaluation de la surface Σ du cône bleu représentait une mesure plus correcte que l'évaluation de l'angle α' au sommet du cône bleu. L'équation (96) définit donc la vitesse fondamentale de propagation laminaire de la flamme.

Dans cette formule apparaît la densité ρ_M du mélange Air-Combustible qui dépend de la densité de vapeur du kérosène. Toutes les mesures à entreprendre sur les flammes

sortant du brûleur ne seront valables que si le combustible injecté sous forme de gouttelettes est totalement vaporisé dans la section de sortie. En conséquence, la recherche des caractéristiques des flammes des mélanges Air-Kérosène devra être précédée d'une étude de la vaporisation.

Pour calculer ρ_M , la connaissance de la densité de vapeur du kérosène est indispensable. Des essais de détermination avec l'appareil de DUMAS n'ont donné aucun résultat car le kérosène, mélange complexe, ne possède pas une température de vaporisation bien définie : si l'on vaporise les constituants légers, les hydrocarbures lourds restent à l'état liquide et si l'on tente de vaporiser les constituants lourds, il y a « cracking » des hydrocarbures légers. Le kérosène se comporte différemment lorsqu'il est injecté sous forme de fines gouttelettes, la pulvérisation facilitant la vaporisation, mais dans ce cas, on ne peut déterminer expérimentalement la densité de vapeur du combustible. Cet inconvénient nous a conduit à faire l'hypothèse que la vapeur du kérosène se comportait comme un gaz parfait. Ainsi, on peut calculer les densités ρ_M théoriques en fonction du rapport Air/Combustible. En désignant par :

M_1 , la masse moléculaire de l'air;

M_2 , la masse moléculaire du kérosène;

V , le volume moléculaire.

La masse moléculaire du mélange est donnée par :

$$M = \frac{(A + C) M_1 M_2}{A M_2 + C M_1},$$

ou :

$$M = \frac{\left(1 + \frac{A}{C}\right) M_1 M_2}{\frac{A}{C} M_2 + M_1},$$

et la densité ρ_M à la température de préchauffage T est :

$$(97) \quad \rho_M = \frac{T_0}{T} \times \frac{\left(1 + \frac{A}{C}\right) M_1 M_2}{\frac{A}{C} M_2 + M_1} \times \frac{1}{V}.$$

Le rapport $\frac{A}{C} = \frac{Q_A}{Q_C}$ étant mesuré expérimentalement, l'équation (97) permet de calculer ρ_M . Les valeurs théoriques de ρ_M ainsi définies seront utilisées dans les différentes mesures.

4.2.2 Si l'écoulement est turbulent le profil des vitesses suivant un diamètre du tube n'est plus parabolique comme dans le cas des écoulements laminaires. Cependant, en chaque point de la flamme il est toujours possible d'appliquer la relation de GOUY [40] et l'on a :

$$v_t = v_0 \cos \alpha.$$



Fig. 45 *a*.



Fig. 45 *b*.

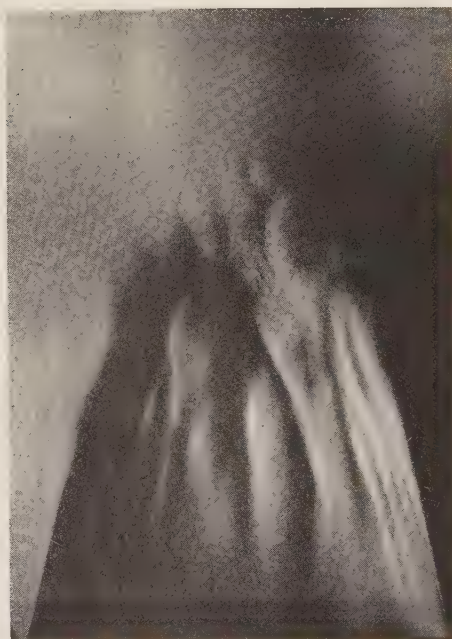


Fig. 45 *c*.

A partir de la définition de la vitesse fondamentale de propagation on peut définir une vitesse fondamentale de propagation turbulente V_t telle que :

$$(98) \quad V_t = \frac{V_0 S}{\Sigma} = \frac{Q_M}{\rho_M \Sigma},$$

avec S = surface de la section de sortie;

Σ = surface du cône bleu;

$Q_M = Q_A + Q_G$, débit-masse total.

Des travaux théoriques [48], [42] et des études expérimentales, dues principalement à DAMKOHLER et LEWIS et VON ELBE [49], ont montré que dans le cas des combustibles gazeux la vitesse V_t dépend seulement du nombre de Reynolds et lui est reliée par une équation de la forme :

$$(99) \quad V_t = k R_e^x,$$

k étant une constante spécifique du mélange. Cette équation valable seulement si $R_e > 3\,000$ peut s'écrire :

$$(100) \quad \frac{V_t}{V_l} = k' R_e^x.$$

Nous essaierons expérimentalement de vérifier si ces formules sont applicables aux mélanges Air-Kérosène et, dans l'affirmative, de déterminer k' et x .

4,3

ÉTUDE DE LA VAPORISATION ET DES LIMITES DE STABILITÉ DES FLAMMES

4,3.1 Le kérosène injecté sous forme de gouttelettes se transforme en vapeur sous l'influence du courant d'air chaud. Les mesures de vitesses de propagation ne seront valables que si le kérosène est totalement vaporisé. Pour une gamme de vitesses déterminées du mélange dans le brûleur, la vaporisation totale du kérosène dépend du degré de pulvérisation du combustible et de la température du courant d'air chaud.

Nous avons vu (§ 4,1.2) que le degré de pulvérisation optimum du combustible, fixé par les performances de l'injecteur et de la pompe d'injection, correspond à des débits Q_G compris entre 0,19 et 0,50 g/s. Il restait à déterminer la température de préchauffage à donner au courant d'air, pour obtenir une vaporisation totale. Celle-ci peut être recherchée par l'observation visuelle de la flamme, et par l'étude des variations des limites de stabilité de la flamme en fonction de la température de l'air :

a) s'il subsiste des gouttelettes de kérosène non vaporisé, elles brûlent en traversant le front de flamme et donnent des traînées lumineuses caractéristiques (*fig. 45a*). Au contraire, si la vaporisation est totale, la flamme présente un aspect uniforme et homogène (*fig. 45b*);

b) les variations des limites de stabilité en fonction de la température de l'air préchauffé ont été recherchées au moyen du brûleur précédemment décrit, équipé d'une

tuyère de 4,5 cm. On obtient ainsi une flamme turbulente. Afin d'étudier la vaporisation du kérosène indépendamment de la quantité de combustible injectée, on repère la température du mélange après vaporisation au moyen de la sonde t_2 (fig. 43).

Pour une température constante du mélange Air-Combustible et pour une valeur déterminée du débit de kérosène, la flamme se stabilise à l'extrémité du tube du brûleur pour certains débits d'air Q_A . Si nous augmentons le débit d'air, il existe une valeur critique $(Q_A)_s$ pour laquelle la flamme sera soufflée à l'extérieur du tube. Inversement, si nous diminuons le débit d'air, la flamme se propagera à l'intérieur du tube pour une valeur $(Q_A)_R$. On peut donc rechercher, à température constante du mélange, les valeurs

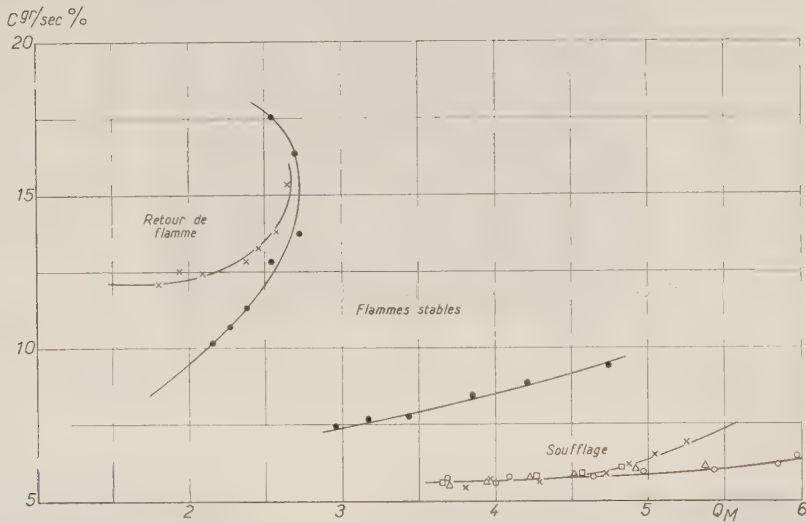


Fig. 46. — Variations des limites de stabilité en fonction de la température de préchauffage. Flammes turbulentes.

température de préchauffage ● 100° C. × 120° C. ○ 140° C. △ 180° C. □ 210° C.

des débits critiques $(Q_A)_s$ et $(Q_A)_R$ (soufflage et retour de flamme) pour chaque valeur du débit de combustible. Ainsi, on obtient les courbes des débits-masse totaux de soufflage et de retour de flamme :

$$Q_{MS} = (Q_A)_s + Q_C,$$

$$Q_{MR} = (Q_A)_R + Q_C,$$

en fonction du pourcentage de combustible introduit dans l'air :

$$C_{g/s} \% = 100 \times \frac{Q_C}{Q_A + Q_C} = \frac{100}{1 + \frac{A}{C}}.$$

Ces courbes peuvent être établies pour différentes valeurs de la température du mélange.

Les résultats obtenus (fig. 46) montrent que :

— à la température de 100° C, les limites de stabilité sont relativement étroites, la présence de nombreuses gouttelettes dans la flamme indique que la vaporisation n'est

pas totale. Si le mélange est préchauffé à 120° C, le domaine des flammes stables s'accroît notablement mais quelques gouttelettes subsistent encore. A 140° C, la courbe de soufflage subit un abaissement notable, la courbe de retour de flamme est rejetée hors des limites de fonctionnement de l'injecteur et aucune gouttelette ne traverse le front de flamme. Le domaine des flammes stables est donc très étendu. Si l'on augmente la température du mélange jusqu'à 180 et 210° C, la courbe de soufflage reste inchangée, le domaine de stabilité des flammes ne varie plus, mais les possibilités de l'injecteur diminuent progressivement et l'on ne peut plus atteindre le débit Q_0 maximum. On a constaté, en examinant l'injecteur, un encrassement des rainures de pulvérisation; il se produit, vraisemblablement, avant injection, un cracking des carburants les plus légers contenus dans le kérosène, donc la température de préchauffage est trop élevée.

En définitive, lorsque la température du mélange, repérée au moyen de la sonde t_2 , est de 140° C, la vaporisation paraît totale et les performances de l'injecteur ne sont pas affectées. Ainsi, nous pouvons fixer la température du mélange à maintenir dans toutes les expériences. Pour tenir compte des variations de vitesse de l'écoulement dans les différents essais, et conserver une vaporisation totale, nous avons choisi une température un peu plus élevée : 150° C.

4,3.2 Les limites de stabilité des flammes turbulentes peuvent être recherchées en fonction du diamètre de la tuyère de sortie du brûleur en conservant constante et égale à 150° C la température du mélange avant combustion. Nous avons constaté que :

- le débit de soufflage Q_{MS} s'accroît avec le diamètre de la tuyère de sortie;
- le débit de retour de flamme Q_{MR} augmente également avec le diamètre de la tuyère;
- enfin, le domaine des flammes stables est d'autant plus réduit que le diamètre de la tuyère de sortie du brûleur est plus grand.

Divers expérimentateurs ont montré [48], en étudiant certains combustibles gazeux, que la vitesse critique de retour de flamme $V_R = \frac{Q_{MR}}{\rho_M S}$ était une fonction du diamètre D du tube du brûleur :

$$(101) \quad V_R = KD^x.$$

Nous n'avons pu mettre cette loi en évidence, car les possibilités de fonctionnement du brûleur sont limitées à l'utilisation de gammes de débits (Air et Combustible) assez étroites. De ce fait, le diamètre de la tuyère de sortie ne peut varier au maximum que de 4 à 5,6 cm.

Cependant, quelle que soit la tuyère utilisée, les courbes de retour de flamme et de soufflage qui déterminent le domaine des flammes stables ont toutes la même forme (fig. 47). On remarquera la similitude de ces courbes avec celles obtenues par divers auteurs [42] en étudiant des combustibles gazeux.

4,3.3 Au moyen du montage permettant de réaliser des flammes laminaires (§ 4,2.1) on a recherché les limites de stabilité de ces flammes.

Les débits critiques de retour de flamme $(q_M)_R$ n'ont pu être déterminés avec le dispositif employé. En effet, si l'on provoque un retour de flamme dans le tube de prélèvement, la flamme, parvenant au pot d'échappement, provoque une explosion qui détériore le brûleur, en particulier les grilles de régularisation.

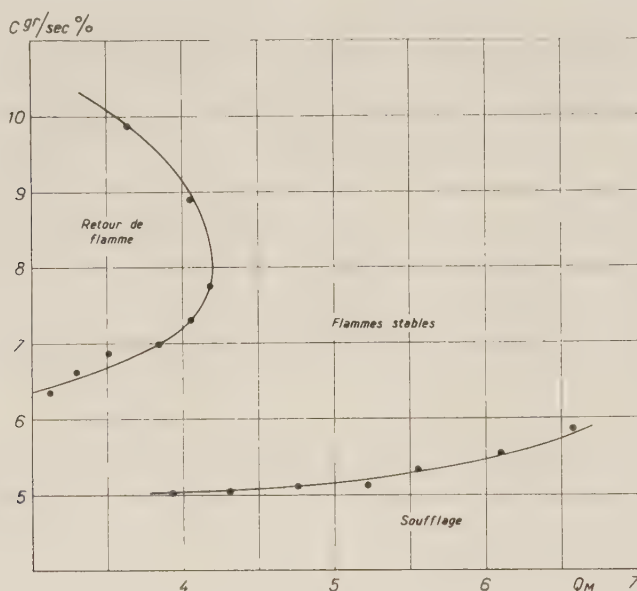


Fig. 47. — Limites de stabilité flammes turbulentes, Température de préchauffage 150° C.

Les débits critiques de soufflage $(q_M)_s$ ont été mesurés avec des tubes de différents diamètres. On constate que les débits augmentent, comme on pouvait le prévoir, avec le diamètre du tube.

4,4 OBSERVATION DES FLAMMES LAMINAIRES ET TURBULENTES

Les flammes ont été photographiées avec un appareil qui donne la possibilité de prendre des clichés à faible distance. Pour une distance « film-flamme » de l'ordre de 1 m, on obtient des images de la flamme suffisamment exposées en utilisant des temps de pose de 1/25 ou 1/50 de seconde. En employant des temps de pose plus courts, 1/500 ou 1/250 de seconde, on n'enregistre sur la pellicule que la trace du cône bleu.

Afin de préciser la structure des flammes, nous avons utilisé la strioscopie [50]. Le dispositif employé, parfaitement classique et appelé « montage en T », comportait, comme source de lumière, une lampe à vapeur de mercure de 500 W.

En examinant les différentes photographies effectuées on observe que :

a) les flammes obtenues à partir de tubes de prélèvement de différents diamètres sont bien laminares. Le cône bleu, surmonté d'un panache (zone de combustion secondaire), a sensiblement l'aspect d'un cône de révolution. Évidemment il subsiste un arrondi

au sommet du cône et à la base [45] (*fig. 48a*). Les clichés de strioscopie (*fig. 48b*) confirment la structure laminaire de ces flammes, mais le panache présente quelques perturbations anormales. Ces perturbations sont dues à des courants de convection, difficiles à éviter pratiquement, qui proviennent du pot d'échappement;

b) dans le cas des écoulements turbulents on sait que le profil des vitesses établi suivant un diamètre du tube n'est plus parabolique comme pour les écoulements laminaires. Le gradient de vitesse, très élevé au voisinage de la paroi, croît rapidement. D'après les lois de la turbulence, l'amplitude des fluctuations étant nulle à la paroi, la vitesse de déflagration est égale en ces points singuliers à la vitesse laminaire. L'écoulement est donc

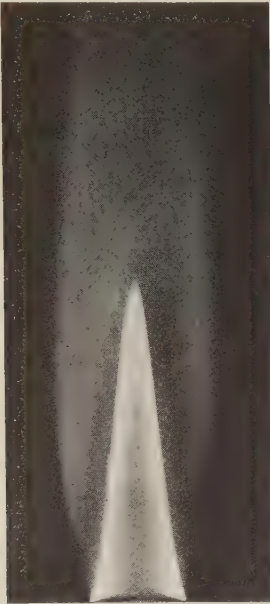


Fig. 48 a.



Fig. 48 b.

constitué par des filets laminaires à la périphérie du tube qui entourent un noyau turbulent. En conséquence, l'épaisseur de la zone de combustion (cône bleu) doit être très petite au voisinage des parois, comme pour une flamme laminaire, et nettement plus importante dans le noyau turbulent.

Sur les photographies de flammes turbulentes que nous avons faites (*fig. 45b*), on constate bien que le cône bleu possède une épaisseur, faible près des parois du tube, et notable dans le noyau turbulent. Ce cône bleu, qui n'est pas un cône de révolution, est surmonté d'un panache important.

Les clichés de strioscopie (*fig. 45c*) confirment ces résultats avec plus de netteté. Quel que soit le diamètre de la tuyère de sortie utilisée, le rapport Air/Combustible et la vitesse du mélange, on observe un front de flamme régulier à la périphérie du tube et des tourbillons caractéristiques dans le noyau turbulent.

4,5

MESURE DES VITESSES DE PROPAGATION DES FLAMMES LAMINAIRES ET TURBULENTES

La vitesse de propagation est définie par les relations (96) et (98) :

$$V_t = \frac{Q_M}{\rho_M \Sigma} \quad \text{et} \quad V_l = \frac{q_M}{\rho_M \Sigma}.$$

Le débit-masse total Q_M est déduit des mesures de débits d'Air et de Combustible et nous avons vu (§ 4,2.1) comment on calculait q_M et ρ_M . La détermination de la vitesse de propagation de la flamme ne dépendait donc plus que de la mesure de la surface Σ du cône bleu. Pour cela nous avons employé la méthode suivante.

4,5.1 Dans le plan de la section de sortie du brûleur nous avons installé une « base de mesure » constituée par une fente lumineuse ayant exactement 1 cm de longueur. Cette fente lumineuse, réglable, est disposée dans le prolongement d'un diamètre de la section de sortie du brûleur. On oriente l'appareil photographique perpendiculairement à ce diamètre et, pour chaque mesure, la flamme et la fente sont photographiées simultanément. Le négatif obtenu est projeté sur un écran et l'image formée est environ le double de la grandeur réelle de la flamme. Sur cette image on mesure les dimensions caractéristiques du cône bleu.

a) Pour les flammes laminaires, le cône bleu a été assimilé à un cône de révolution ayant pour base la surface du tube de prélèvement. La seule dimension mesurée sur l'image est donc la hauteur h du cône et l'on a :

$$\Sigma = \pi r a \quad \text{avec} \quad a = \sqrt{r^2 + h^2}$$

r = rayon du tube.

b) Dans le cas des flammes turbulentes le cône bleu n'est plus un cône de révolution et la zone de combustion est d'une épaisseur notable dans le noyau turbulent. Nous avons adopté le contour interne comme surface réelle d'inflammation et la surface Σ a été mesurée en décomposant le cône bleu en un ensemble formé de cônes et de troncs de cônes $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$

4,5.2 La précision des mesures de vitesse de propagation dépend des erreurs commises sur la mesure des débits (Air et Combustible) et sur la détermination de la surface Σ du cône bleu. De plus, elle est subordonnée aux approximations faites précédemment concernant :

— la densité ρ_M , qui représente une valeur théorique calculée à la température t_2 du mélange Air-Kérosène;

— le débit q_M , qui constitue, dans le cas des flammes laminaires, une valeur approchée par rapport au débit réel passant dans les tubes de prélèvement.

Par suite, l'erreur globale commise sur la mesure de la vitesse de propagation ne peut être rigoureusement calculée. Une évaluation de cette erreur a été effectuée en tenant

compte des différentes erreurs et en considérant la dispersion des résultats expérimentaux. La précision n'est pas excellente et l'erreur moyenne sur les vitesses V_l et V_t est de l'ordre de 8 %; dans les cas les plus défavorables cette erreur peut s'élever jusqu'à 10 %.

Enfin, toutes les mesures ont été faites à partir de photographies directes de la flamme. Or, SHERRATT et LINETT [51] ont constaté que le cône bleu d'une flamme laminaire photographiée directement, par strioscopie, ou par la méthode des ombres, ne possédait pas les mêmes dimensions. Si nous prenons en considération les différences de dimensions provenant des méthodes photographiques, nous devons admettre une erreur supplémentaire de 2 % sur les vitesses de propagation V_l et V_t .

Les mesures effectuées à la température $t_2 = 150^\circ \text{C}$ ont fourni les résultats suivants.

4,3.5 La vitesse de propagation laminaire V_l , mesurée pour des rapports Air/Combustible compris entre 16 et 10, varie de 30 à 38 cm/s (*fig. 49*). La vitesse V_l maximum apparaît pour un rapport A/C plus riche que le mélange stoechiométrique.

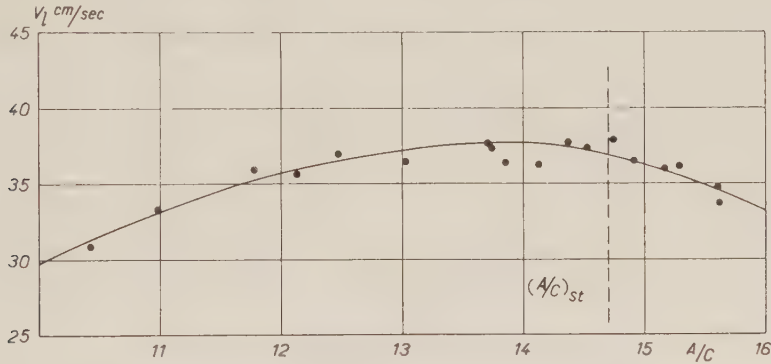


Fig. 49. — Vitesse de propagation des flammes laminaires.
Tubes de diamètre $\Phi = 1,41 \text{ cm}$, $\Phi = 1,61 \text{ cm}$. Température de préchauffage 150°C .

En outre, il a été constaté, au cours des différentes mesures, que la vitesse de propagation laminaire était indépendante :

- du diamètre du tube de prélèvement;
- de la vitesse initiale du mélange dans le tube, pourvu que le nombre de Reynolds reste inférieur à 2 300.

Bien que les données sur la vitesse de propagation de la flamme des combustibles liquides soient peu nombreuses, des mesures ont été faites par JOHNSTON [43] sur l'essence. Il a montré que V_l à la température de 150°C était compris entre 24 et 48 cm/s. Si nous tenons compte des différences de composition des mélanges d'hydrocarbures constituant l'essence et le kérosène, ces résultats sont en bon accord.

4,5.4 Les vitesses de propagation des flammes turbulentes ont été mesurées en fonction du rapport A/C, en conservant constante la vitesse initiale V_0 du mélange, donc également le nombre de Reynolds. Nous avons constaté que :

— la vitesse maximum de propagation V_t apparaît toujours pour un rapport A/C plus riche que le stoechiométrique;

— si, en changeant la tuyère de sortie du brûleur, on diminue la vitesse V_o (donc également R_e), on constate en fonction du rapport A/C que toutes les valeurs de V_t diminuent;

— si l'on augmente R_e on observe, en sens inverse, le même phénomène. La vitesse de propagation turbulente V_t est donc une fonction du nombre de Reynolds. Pour étudier cette fonction nous avons effectué des mesures en augmentant simultanément les débits

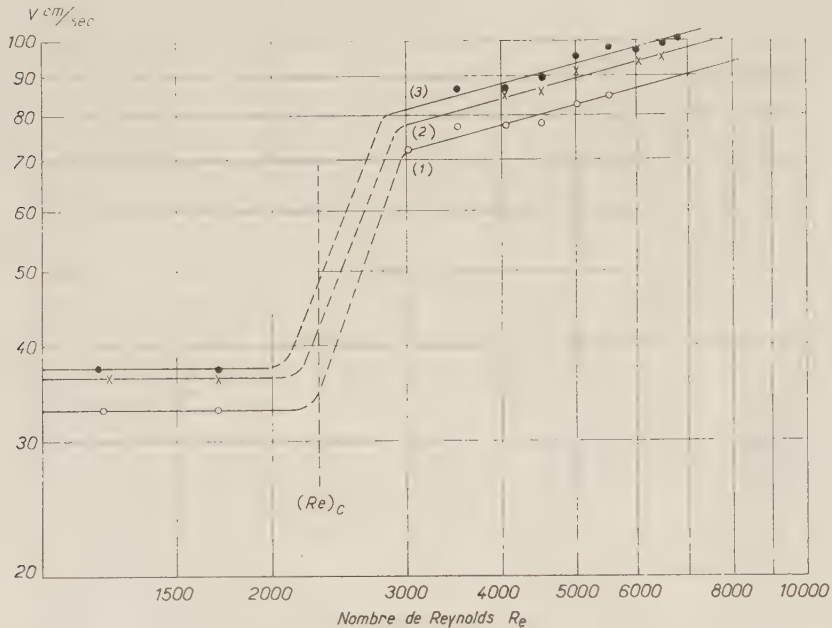


Fig. 50. — Vitesses de propagation de la flamme en fonction du nombre de Reynolds.

(1) Rapport $\frac{A}{C} = 11$.

(2) Rapport $\frac{A}{C} = 15$.

(3) Rapport $\frac{A}{C} = 13$.

Température de préchauffage 150°C .

Q_A et Q_C , mais en conservant le rapport A/C constant. Cette expérience a été répétée pour diverses valeurs du A/C .

Le nombre de Reynolds défini par la relation (90) est déterminé avec une certaine erreur, car nous ignorons les valeurs de la viscosité cinématique des mélanges Air-Kérosène vapeur. Nous avons adopté pour ν les valeurs de la viscosité cinématique de l'air à la température du mélange (150°C). Remarquons que l'erreur commise sur R_e doit être faible car la concentration de combustible dans le mélange excède rarement 10 %.

Les résultats de ces mesures montrent que pour un rapport Air/Combustible défini, le logarithme de la vitesse de propagation V_t croît linéairement avec le logarithme du nombre de Reynolds (fig. 50) conformément à l'équation (99) précédemment écrite (§ 4,2,2). Le fonctionnement du brûleur étant subordonné aux performances de l'injecteur,

teur et aux possibilités du compresseur d'air, nous avons dû limiter les mesures à des valeurs de R_e comprises entre 3 000 et 7 000.

Si, à partir de ces résultats, on forme pour chaque point de mesure le rapport V_t/V_l , on constate que les points expérimentaux se groupent sur une seule droite (fig. 51). Ce résultat est en accord avec l'équation (100) (§ 4,2.2) et les valeurs numériques obtenues nous permettent de calculer k' et x :

$$\begin{aligned} V_t &= k' V_l R_e^x, \\ V_t &= 0,2677 V_l R_e^{0,262}. \end{aligned}$$

Ces deux valeurs des coefficients k' et x ne correspondent pas à celles déterminées par P. DELBOURG [48] pour des combustibles gazeux (propane et gaz de ville), qui a

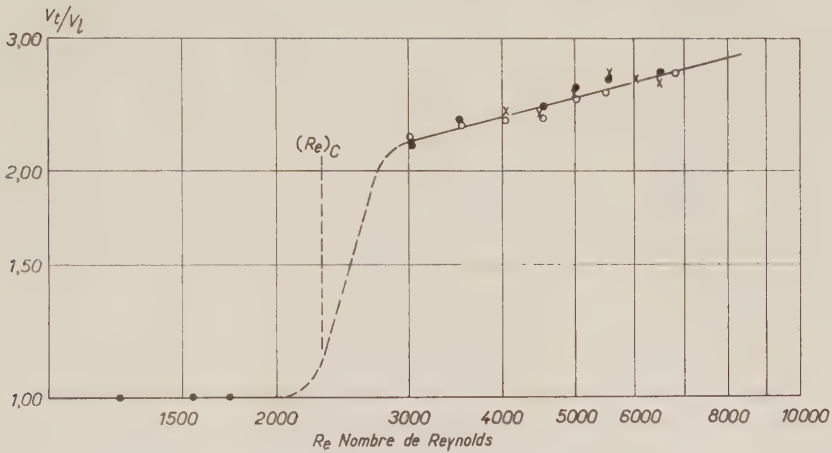


Fig. 51. — Température de préchauffage 150° C.

trouvé $k' = 0,088$, $x = 0,40$. Par contre, dans un travail récent, C. WILLIAM et H. BOLLINGER [52] ont étudié les vitesses de propagation turbulente des mélanges Air-Propane, Air-Acétylène, Air-Éthylène, dans des tubes de différents diamètres. Ces auteurs ont montré que la vitesse V_t dépendait, non seulement du nombre de Reynolds, mais aussi du diamètre du tube, et qu'elle pouvait être représentée par la formule empirique :

$$\frac{V_t}{V_l} = 0,1761 d^{0,2564} R_e^{0,238}.$$

Si dans cette relation nous remplaçons le diamètre du tube d , par les valeurs des diamètres des tuyères que nous avons utilisées, on trouve :

$$\begin{aligned} V_t &= 0,2478 V_l \times R_e^{0,238} && \text{pour } d = 4,5 \text{ cm;} \\ V_t &= 0,2687 V_l \times R_e^{0,238} && \text{pour } d = 5,2 \text{ cm;} \\ V_t &= 0,2739 V_l \times R_e^{0,238} && \text{pour } d = 5,6 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Or, la plupart de nos mesures en écoulement turbulent ont été faites avec la tuyère de 5,2 cm de diamètre. Donc, nos résultats coïncident assez bien avec ceux de C. WIL-

LIAM et H. BOLLINGER surtout si nous tenons compte des erreurs de mesure, les vitesses de propagation des flammes étant très difficiles à mesurer avec précision.

De ce résultat semble ressortir la conclusion suivante : « Le kérosène, lorsqu'il est intégralement vaporisé, brûle dans l'air en se comportant comme un hydrocarbure gazeux, puisque nous trouvons en fonction du nombre de Reynolds une relation définissant le rapport V_t/V_l semblable à celle établie pour le propane, l'acétylène et l'éthylène. »

4,6

MESURE DES TEMPÉRATURES DE LA FLAMME

4,6.1 Pour repérer les températures atteintes par la flamme, nous avons choisi la méthode de renversement des raies du sodium, due à FERY [41]. Cette méthode est assez pratique, car elle permet de déterminer les températures sans modifier la combustion, contrairement aux méthodes thermo-électriques (introduction d'un thermo-couple dans la flamme). En nous référant à des travaux antérieurs [59], [53], [54], [55], le montage optique de mesure des températures a été ainsi réalisé :

— la source de lumière S est constituée par une lampe à ruban de tungstène. Une lentille L_1 forme à l'intérieur de la flamme l'image de la source. Une seconde lentille L_2 projette l'image de la source et de la flamme sur la fente d'un spectroscopie S_p . Deux diaphragmes D_1 et D_2 , convenablement placés sur le trajet des rayons lumineux, permettent de régler l'ouverture du faisceau;

— la lampe à ruban de tungstène est alimentée par l'intermédiaire d'un alternostat, un ampèremètre permet de repérer l'intensité passant dans la lampe. En effectuant des pointés pyrométriques sur l'image de S, formée par L_1 , avec le pyromètre monochromatique de G. RIBAUD (longueur d'onde $\lambda_R = 0,655 \mu$), on établit une courbe d'étalonnage des températures de brillance S_R de la source en fonction de l'intensité de courant passant dans la lampe;

— la flamme, transparente, doit être colorée par un sel de sodium qui émet la longueur d'onde $\lambda_J = 0,589 \mu$. Pour obtenir cette coloration, nous avons employé le circuit d'air alimentant le brûleur pour introduire du chlorure de sodium dans la flamme. Sur la conduite d'amenée d'air, immédiatement en aval du four de préchauffage, une dérivation a été installée. Une fraction réglable de la quantité d'air totale employée passe par cette dérivation. Elle traverse un récipient cylindrique contenant du chlorure de sodium finement pulvérisé. L'air pénètre dans le récipient tangentiellement à la paroi, à une certaine vitesse, de l'ordre de 50 à 500 cm/s. Il crée ainsi un tourbillon qui entraîne des particules de NaCl, par la conduite de départ située à la partie supérieure du récipient.

Au moment du renversement des raies, la température de la flamme est égale à la température de brillance S_J pour la longueur d'onde λ_J . La lampe ayant été étalonnée pour la longueur d'onde λ_R , différente, on doit effectuer la correction des températures de brillance. Cette correction se calcule à partir de la formule de WIEN et l'on a :

$$(102) \quad \frac{1}{S_J} - \frac{1}{S_R} = \frac{1}{C_2} (\lambda_R \text{ Log } \epsilon_R - \lambda_J \text{ Log } \epsilon_J),$$

avec $C_2 = 14\,320 \mu$; ϵ_R, ϵ_J = pouvoirs émissifs du tungstène pour les longueurs d'ondes λ_R et λ_J .

A partir de la relation (102) on établit une courbe de correction dans le domaine de températures utiles.

En définitive, on déduit de la mesure de l'intensité de courant passant dans la lampe la température de brillance de la flamme. La température réelle de la flamme correspond à la température réelle du ruban de tungstène. On trouve dans les tables numériques [56] la correspondance entre les températures de brillance et les températures réelles du tungstène.

4.6.2 Cette méthode a été utilisée pour mesurer la température des flammes laminaires. Des explorations systématiques des flammes laminaires de combustibles gazeux ont

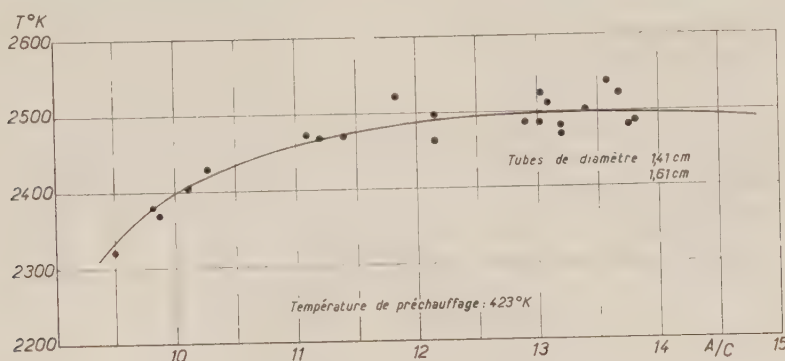


Fig. 52. — Flammes laminaires. Température de la flamme au sommet du cône bleu.

été faites par différents expérimentateurs. Il a été montré que, dans la flamme, la température maximum se situait au voisinage du sommet du cône bleu. De ce fait, nous nous sommes limité à un seul pointé dans la flamme, 2 à 3 mm au-dessus du sommet du cône bleu. L'image de la source dans la flamme, assez fine ($1,5 \times 5,0$ mm), permet des pointés relativement précis.

En fonction du rapport Air/Combustible les températures varient entre 2 320 et 2 500° K (fig. 52). De nombreuses mesures ont été faites et nous avons observé que :

— les températures sont indépendantes du diamètre du tube de prélèvement et du débit q_M passant dans ces tubes;

— la température maximum, 2 500° K, apparaît pour un rapport A/C de 13,75 qui correspond à la vitesse de propagation V_f maximum de la flamme;

— si nous tenons compte de la température de préchauffage du mélange Air-Combustible (150° C) l'élévation de température ΔT fournie par la flamme est de l'ordre de 2 000° K;

— la méthode de mesure employée est assez fidèle et l'écart maximum des points par rapport à la courbe tracée est de 1,6 %.

4,6.3 Les températures des flammes turbulentes ont été mesurées en fonction du rapport Air/Combustible, en conservant constante la valeur du nombre de Reynolds. Nous nous sommes limité à une seule mesure dans la flamme au voisinage du sommet du cône bleu. Les résultats (*fig. 53*) sont semblables à ceux obtenus pour les flammes laminaires :

- les températures évoluent avec le rapport A/C de 2 300 à 2 500° K;
- la température maximum coïncide à peu près avec la vitesse de propagation V_t maximum, pour un rapport A/C égal à 13,75.

Si l'image de la source est facilement localisée, au-dessus du sommet du cône bleu, dans le cas des flammes laminaires, par contre, les réglages sont plus délicats dans le cas des flammes turbulentes. Les oscillations du cône bleu, dues à l'existence du noyau turbulent, gênent les réglages. Par ailleurs, la répartition des températures dans les flammes turbulentes est moins bien connue que pour les flammes laminaires.

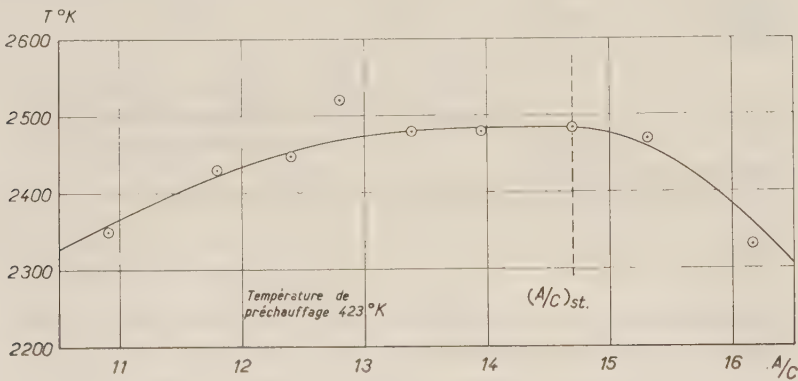


Fig. 53. — Flammes turbulentes. Température de la flamme au sommet du cône bleu.
 $V_o = 320$ cm/sec $R_o = 5820$.

En conséquence, il était indispensable de vérifier si les pointés effectués au-dessus du sommet du cône bleu correspondaient à la température maximum. Pour cela, le brûleur a été rendu mobile au moyen d'un vérin hydraulique et, en maintenant le rapport A/C constant, différentes mesures ont été faites dans la flamme. La position de l'image de la source dans la flamme était repérée par les déplacements imposés au brûleur et, avant chaque mesure de température, un miroir en acier inoxydable introduit dans la flamme permettait d'examiner si la position de cette image était correcte. Des photographies de la flamme ont été faites, en même temps que les mesures de températures, de manière à obtenir la « carte » des températures sur l'image de la flamme projetée en grandeur réelle au moyen d'un agrandisseur.

Ces mesures (*fig. 54*) montrent que :

- les températures les plus élevées suivent approximativement le contour du cône bleu. En s'éloignant du cône bleu dans la panache de la flamme, les températures diminuent. Le maximum de température correspond à peu près au sommet du cône. Toutefois, on observe sur le côté droit du cône bleu des températures légèrement supérieures; l'écart, de l'ordre de 1 %, peut provenir :

- des erreurs de mesures;
- des légères variations du rapport Air/Combustible.

Celui-ci devrait être maintenu constant durant l'exploration de la flamme. Or, cette exploration est relativement longue, et pendant ce temps, il est difficile d'éviter les petites fluctuations de la pompe d'injection et du compresseur d'air.

4,6.4 La comparaison des températures mesurées avec les températures théoriques précédemment calculées est assez satisfaisante. Si nous tenons compte de la température de préchauffage t_1 de l'air, avant vaporisation du combustible, la température théorique maximum atteinte par la flamme sous la pression de une atmosphère est de 2520°K . L'écart avec la température la plus élevée mesurée, 2500°K , est inférieur à 1 %.

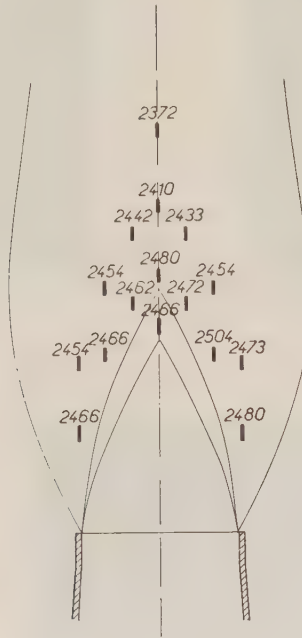


Fig. 54. — Températures repérées dans une flamme turbuente — Rapport A/C constant.

Pour les rapports A/C plus pauvres que le stoechiométrique, les températures mesurées et calculées sont en bon accord (écarts compris entre 1 et 3 %). Par contre, aux rapports A/C riches, les températures mesurées sont supérieures aux températures calculées (écarts de 1 à 10 %). Vraisemblablement, l'air atmosphérique intervient dans la combustion (air induit), modifiant ainsi la richesse du mélange et provoquant une élévation de la température. Mais, les écarts observés peuvent aussi provenir :

- des erreurs dues à la méthode de mesure;
- de l'unique mesure effectuée dans la flamme au sommet du cône bleu. En ce lieu, la température mesurée est maximum, tandis que la température théorique calculée représente une valeur moyenne. Aussi, il serait nécessaire de déterminer par des explo-

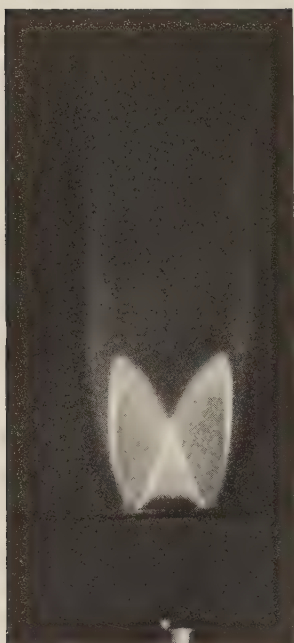


Fig. 55 a.



Fig. 55 b.



Fig. 56.

rations systématiques de la flamme à chaque rapport A/C une température moyenne mesurée pour effectuer une comparaison rigoureusement valable.

En définitive, le brûleur mis au point a permis de déterminer les caractéristiques fondamentales de la flamme des mélanges Air-Kérosène :

- température de vaporisation du combustible pulvérisé;
- vitesses de propagation des flammes laminaires et turbulentes;
- température de la flamme.

Au moyen de cet appareil on peut étudier également la stabilisation de la flamme sur des obstacles placés dans l'écoulement. Des travaux sur les flammes stabilisées par des obstacles ont été faits à partir de combustibles gazeux (propane), notamment par G. C. WILLIAM [57] en Angleterre, et B. LEWIS et G. VON ELBE aux États-Unis [58].

En utilisant le brûleur Air-Kérosène, on a réalisé quelques expériences purement qualitatives.

Dans un écoulement laminaire, on a placé, perpendiculairement à l'axe de l'écoulement, un stabilisateur constitué par un barreau cylindrique. On obtient une flamme qui présente l'aspect de deux surfaces formant entre elles un certain angle. Les points d'accrochage de la flamme paraissent localisés aux points où la vitesse locale de l'écoulement est la plus faible (*fig. 55a*). Si nous augmentons la vitesse de l'écoulement la flamme se soufle, et à la limite d'extinction, elle ne conserve plus sur le stabilisateur que deux points d'accrochage extrêmement petits (*fig. 55b*).

Avec une tige placée dans l'axe de l'écoulement on peut obtenir dans certaines conditions une flamme en « cône inversé » (*fig. 56*). Il est possible d'utiliser d'autres stabilisateurs : sphères, plaques, tubes, etc. De telles expériences, qui constituent une application du brûleur mis au point, peuvent permettre d'étudier la stabilisation, sur des obstacles variés, de la flamme des mélanges Air-Kérosène. Nous nous proposons d'entreprendre ultérieurement ce travail.

CONCLUSION

Nous nous étions proposé, au début de ce travail, d'étudier la combustion du kérosène dans l'air, en utilisant comme foyer une chambre de turboréacteur. Ce but a été atteint après avoir mis au point des méthodes de mesure appropriées.

Les résultats obtenus autorisent les conclusions suivantes :

— le kérosène brûle dans la chambre en mélange très hétérogène à des rapports Air/Combustible voisins du stoechiométrique. La température des gaz en aval de la flamme varie de 1 000 à 1 500° C. Le rendement de cette combustion est assez mauvais et il apparaît localement des concentrations de CO importantes dues à une oxydation incomplète des atomes de carbone. Au contact de l'air de dilution qui apporte de l'oxygène, la combustion se poursuit. Les imbrûlés sont oxydés en CO₂, il se forme un peu de NO et le rendement de combustion est considérablement amélioré; puis, l'air de dilution en excès refroidit les gaz et arrête la réaction de combustion. A la sortie de la chambre, c'est-à-dire en fin de combustion, le rendement est suffisamment bon pour que les valeurs numériques des différentes quantités mesurées soient très voisines des valeurs calculées;

— les concentrations des produits de combustion analysés CO₂, CO, NO et O₂ évoluent suivant les lieux de mesure en fonction de l'état du mélange;

— les températures peuvent être déterminées à partir de la mesure des concentrations d'anhydride carbonique. Cette méthode de détermination pourra être utilisée chaque fois que des températures trop élevées ne pourront être mesurées par des procédés thermo-électriques.

Si le processus de combustion du kérosène a été établi dans une chambre de turboréacteur, par contre, on ne pouvait pas rechercher, avec un tel foyer, les caractéristiques de la flamme. Pour déterminer celles-ci nous avons réalisé un brûleur Air-Kérosène qui donne une flamme à cône bleu.

Les mesures effectuées nous permettent de conclure que :

— le kérosène pulvérisé se transforme en vapeur à la température de 150° C lorsque la vitesse de l'écoulement est inférieure à 500 cm/s;

— la vitesse de propagation V_l des flammes laminaires varie, suivant le rapport A/C, de 33 à 38 cm/s;

— la vitesse de propagation V_t des flammes turbulentes est assez bien représentée, pour des nombres de Reynolds compris entre 3 000 et 7 000, par la relation empirique :

$$V_t = 0,2677 V_l R_e^{0,262};$$

— la température de la flamme évolue en fonction du rapport A/C de 2 300 à 2 500° K. En tenant compte de la température de préchauffage de l'air, les valeurs ainsi mesurées correspondent aux valeurs théoriques calculées.

Le brûleur Air-Kérosène nous a donné la possibilité d'obtenir les caractéristiques essentielles de la flamme des mélanges Air-Kérosène. Mais ce brûleur fonctionne pour des vitesses d'écoulement faibles, tandis que les vitesses existant dans les engins couramment utilisés sont beaucoup plus élevées. Il existe certainement des caractères communs entre la flamme se propageant dans des écoulements à grande vitesse et la flamme obtenue avec le brûleur.

Par ailleurs, nous soulignerons les possibilités d'utilisation des appareils décrits dans cette étude :

— la méthode d'analyse de gaz continue peut permettre d'étudier différents foyers quel que soit le combustible employé;

— le brûleur Air-Kérosène réalisé peut, convenablement adapté, servir pour mesurer les caractéristiques des flammes et rechercher les conditions de vaporisation de différents combustibles liquides.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HOPKINS J. L. — *Technical Report*, n° I.C.T./2. The Shell Petroleum Company.
- [2] SPIERS H. M. — *Technica Data on Fuels*. Londres (1950).
- [3] JUSTI. — *Inst. Chal. Sp. Enthalpies et Entropies des Gaz Industriels* (1938). Traduction S.D.I.T.
- [4] MANSON N. — *Propagation des détonations et des déflagrations dans les mélanges gazeux*. O.N.E.R.A. et I.F.P. (1947).
- [5] VICHNIEVSKY R. — *Thèse*, Paris (1943).
- [6] MONTAGNE. — *Thèse*, Paris (1934).
- [7] BERENTHET. — *Technical Report*, n° I.C.T./11. The Shell Petroleum Company.
- [8] LUCAS J. — *Report B*. 40 386 (septembre 1945).
- [9] MACFARLANÉ J. J. et HOLDERNESS F. H. — *Power Jets Report*, n° R 1049.
- [10] BOYD. — *S.A.E. Journal* (octobre 1939).
- [11] ROY M. — *Thermo-dynamique des systèmes propulsifs à réaction et de la turbine à gaz*, Dunod, Paris (1946).
- [12] QUILLEVERE A. — *Étude comparative des valeurs du rendement de combustion suivant les définitions utilisées*. — Note O.N.E.R.A. D. 47E (1948).
- [13] WRIGHT. — *Journal Opt. Soc. of America*, **36**, n° 4 (1946), p. 1945.
- [14] VENGEROV. — *Nature*, **158** (1946), p. 28.
- [15] PFUND. — *Journal Opt. Soc. of Am.*, **37** (1947), p. 762.
- [16] Van ZANDT W. — *Review of Scient. Inst.*, **59**, n° 3, p. 135 (1948).
- [17] LUFT K. — *Zeit. fur Techn. Phys.*, **24** (1943), p. 97.
- [18] LUFT K. — *Angewandte Chemie*, n° 1 (1947).
- [19] LUFT K. et RAPPENEAU J. — *Congrès International des Moteurs*, Paris (mai 1951).
- [20] RAPPENEAU J. — *La Recherche Aéronautique*, n° 21, Paris (1951).
- [21] RAPPENEAU J. — *Brevet n° PV 603 356* (18 janvier 1951).
- [22] LLOYD L. — *Trans. of the A.S.M.E.* (mai 1948), p. 335.
- [23] TOPPS J. E. C. — *Measurement of gas turbine combustion efficiency by gas analysis*, R.A.E., E. 3982 (octobre 1943).
- [24] FOURE C. — *Remarques sur l'écoulement des gaz de combustion à l'intérieur de sondes de prélèvement*, Conférence O.N.E.R.A. (1951).
- [25] FOURE C. — *IV^e Congrès International du Chauffage Industriel*, Paris (1952).
- [26] REGNIER J. — *Étude O.N.E.R.A.* (travail non publié).
- [27] VIDRON J. — *Étude O.N.E.R.A.* (travail non publié).
- [28] LALOS G. — *Journal of Research National Bureau of Standard*, Vol. 47, n° 351.
- [29] GUYER et WEBER. — *Brennstoff Chemie*, **14**, p. 405 (1933).
- [30] HOLLINGS. — *Comm. n° 147*, Institute of Gas Eng. (1936).
- [31] ALTIERI. — *Gas analysis and testing of gaseous materials*, Am. Gas. Ass., New-York (1945).
- [32] LANGE B. — *Analyse Colorimétrique*, édit. Dunod, Paris (1947).
- [33] NERNST. — *Zeit Anorg. Chem.*, **45**, p. 126 (1905). — **49**, p. 213 (1906).

- [34] HABER. — *Zeit Phys. Chem.*, **69**, p. 338 (1909).
- [35] FINK. — *Zeit Anorg. Chem.*, **45**, p. 116 (1906).
- [36] ZELDOVICH. — *Acta Physicochimica U.R.S.S.*, **21**, n° 4, p. 577 (1946).
- [37] Frank KAMENETZKY. — *Acta Physicochimica U.R.S.S.*, **22**, n° 1, p. 29 (1947).
- [38] POLYAKOV. — *Acta Physicochimica U.R.S.S.*, **11**, p. 443 (1939).
- [39] LUFT K. — *Congrès International des Moteurs*, Paris (mai 1951). — *Comptes Rendus Ac. des Sc.*, **230**, p. 460 (1950).
- [40] GOUY. — *Thèse*, Paris (1879). — *Ann. de Chimie Physique*, **18** (1879), p. 27.
- [41] FERY. — *Comptes Rendus Ac. des Sc.*, **137**, p. 909 (1903).
- [42] LEWIS et VON ELBE. — *Combustion, Flame and Explosion of Gases*, Cambridge University Press (1951).
- [43] JOHNSTON. — *S.A.E. Journal* (décembre 1947).
- [44] GAMER, LONG et ASHFORTH. — *Fuel*, **28** (1949), p. 272.
- [45] RIBAUD G. — *Chaleur et Industrie*, n° 213 (1938), p. 23.
- [46] LAFFITTE P. — *Chaleur et Industrie*, n° 213 (1938), p. 33.
- [47] COWARD, HARTWELL. — *Journ. Chem. Soc.* (1932), p. 2676.
- [48] P. DELBOURG. — *Thèse*, Paris (1946).
- [49] DAMKOHLER. — *Leit. Elektrochemie*, **46** (1940), p. 601.
- [50] TOPLER. — *Ann. der Physik* **33** (1877), p. 131.
- [51] SHERRATT, LINETT. — *Trans. Farad Soc.*, **43** (1948), p. 596.
- [52] WILLIAM C. et BOLLINGER H. — *III^e Symposium sur la Combustion, les flammes et les phénomènes d'explosion* (1949), p. 176.
- [53] RIBAUD G. — *Conférence au Conservatoire des Arts et Métiers*, Hermann, édit., Paris (avril 1930).
- [54] LAURE et GAUDRY. — *Chaleur et Industrie*, n° 213 (1938), p. 44.
- [55] KOHN. — *Ann. der Physik*, **44**, p. 749 (1914).
- [56] *Handbook of Chemistry and Physics*, 33^e édit., Chem. Rub. Pub. Comp., Cleveland (Ohio).
- [57] WILLIAM G. C. — *Aeronautical Sciences* (décembre 1949).
- [58] LEWIS B. et VON ELBE G. — *Trans. of the A.S.M.E.* (mai 1948).
- [59] BAUER. — *Le Radium*, **6**, pp. 110 et 360 (1909). — *Thèse*, Paris (1912).
- [60] RAPPENEAU J. — *Note au C.R. de l'Acad. des Sc.* (mars 1953).
- [61] KARLOVITZ, KNAPSCHAEFER. — *IV^e Symposium sur la combustion, les flammes et les phénomènes d'explosion*, Waverly Press (1953).
- [62] SCURLOCK, GROVER. — *IV^e Symposium sur la combustion, les flammes et les phénomènes d'explosion* (1953).
- [63] KARLOVITZ. — *Phys. Rev.*, **77**, p. 574 (1950).
- [64] WILLIAM, HOTTEL, SCURLOCK. — *III^e Symposium sur la combustion, les flammes et les phénomènes d'explosion* (1953).
- [65] BURKE, SCHUMANN. — *Ind. Eng. Chem.*, **20**, p. 988 (1928).
- [66] LONGWELL. — *IV^e Symposium sur la combustion, les flammes et les phénomènes d'explosion*, p. 90 (1953).
- [67] KARLOVITZ, DEWISTON, KNAPSCHAEFER. — *IV^e Symposium sur la combustion, les flammes et les phénomènes d'explosion*, p. 613 (1953).
- [68] SCURLOCK. — *Thèse* (1948), Institute of Technology (Massachusetts).
- [69] SHELKIN. — *N.A.C.A. Techn. Memor.*, n° 1190 (1947).
- [70] WOHL, GAZLEY, KAPP. — *IV^e Symposium sur la combustion, les flammes et les phénomènes d'explosion*, Williams et Wilkins, Baltimore (1953).
- [71] GARSIDE, FORSYTH, TOWNEND. — *Journ. Inst. Fuel*, **18**, p. 176 (1945).
- [72] EGBERTON, POWLING. — *Proc. Roy. Soc.*, **193**, p. 172 (1948). — *Proc. Roy. Soc.*, **193**, p. 190 (1948).
- [73] DUGGER. — *Journ. Amer. Chem. Soc.*, **72**, p. 5271 (1950).
- [74] MANSON. — *Jour. Chim. Phys.*, **17**, p. 837 (1949).

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

ÉTUDE DE LA HAUTE ATMOSPHÈRE AU MOYEN DES FUSÉES

Vu et approuvé :

Paris, le 20 mai 1954

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

J. PÉRÈS.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Jean SARRAILH.



IMPRIMERIE



IMPRIMERIE